



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID  
ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Eléctrica

---

# ELECTRICIDAD Y MAGNETISMO, DESDE OERSTED HASTA LA RELATIVIDAD ESPECIAL DE EINSTEIN

---

AUTOR:  
ÓSCAR GÁNDARA GONZÁLEZ

Tutor:

Duque Pérez, Óscar  
Departamento de Ingeniería  
Eléctrica

Valladolid, Julio y 2024

Introducción .....	2
Precedentes .....	4
Oersted descubre la relación entre magnetismo y electricidad .....	5
Ampère y Arago, y la tercera ley de Newton .....	7
Biot y Savart, estudiando los efectos de una corriente sobre un imán. ....	14
Faraday y Henry descubriendo la inducción electromagnética .....	15
Weber y Gauss y como afecta la velocidad relativa de las cargas.....	29
La fuerza de Grassmann y de Ampère, y la fuerza longitudinal.....	30
Maxwell uniendo matemáticamente electricidad y magnetismo .....	33
La relatividad especial atribuida a Einstein.....	40
Conclusiones .....	48
Fórmulas.....	51
Bibliografía .....	56

## Introducción

A principios del siglo XIX, Oersted se da cuenta de la interacción entre electricidad y magnetismo, debido a la desviación de la aguja de una brújula en presencia de una corriente eléctrica.

Muchos científicos se lanzan a realizar sus propios trabajos de investigación con el fin de descubrir la verdad sobre el fenómeno del electromagnetismo, por aquel entonces desconocido. En esta primera etapa, Ampère se centró en la interacción entre corrientes eléctricas, postulando que la corriente es el “hecho primitivo” que produce estos efectos. Ampère en su teoría, busca ajustarse al pensamiento clásico, Newtoniano, de que la fuerza debe tomar la dirección que une los cuerpos que interaccionan entre sí.

Grassmann también realizó una descripción matemática de los experimentos y coincidía con Ampère en que la corriente era la fuente del fenómeno, pero a diferencia de Ampère, Grassmann debía tener en cuenta la fuerza que ejercía sobre sí mismo el propio circuito. Además, con Grassmann no se cumple el principio de acción reacción entre elementos de corriente, pero sí entre circuitos y entre circuito y elemento de corriente. El caso entre los elementos de corriente causó un profundo revuelo en la comunidad científica, ya que se estaba violando la tercera ley de Newton, al tener una fuerza resultante que no seguía la dirección que une los cuerpos que la crean.

A la par de Ampère, Arago realizó un experimento, entre otros, donde inducía un anillo de cobre por la acción de un imán, haciendo que al girar el disco el imán también lo hacía.

La figura de Faraday a nivel experimental fue la más productiva, y destacara sobre todo en las rotaciones electromagnéticas, previamente descrita por Arago, y además se le atribuye ser el primero en postular la idea de líneas de campo.

A mediados del siglo XIX, Maxwell, apoyándose en algunos experimentos realizados hasta la fecha y descripciones matemáticas, redacta un conjunto de leyes matemáticas que unen la electricidad y el magnetismo, donde no pudo decantarse por la idea de Ampère de analizar los fenómenos a través de las corrientes involucradas o por la idea de Grassmann, aunque finalmente se decantaría por la propuesta de Ampère. Además, dio motivos sobre la semejanza de velocidades entre la luz y una onda electromagnética.

A finales del siglo XIX, por el lado de la óptica, se realiza el experimento Michelson-Moley buscando la existencia del éter, supuesto fluido en el que se desplazan los cuerpos celestes y a través del cual viaja la luz, y según ellos puede afectar a la velocidad de la luz, pero el resultado da a entender que no se ve afectada. Dando paso a las conjeturas de FitzGerald sobre la contracción de la longitud que hace cumplir que la luz viaje siempre a la misma velocidad

en el vacío. La idea de FitzGerald llegará a Lorentz, quien desarrolla las transformaciones de Lorentz, para explicar cómo las ecuaciones de Maxwell se transforman entre diferentes sistemas de referencia en movimiento relativo, y la Ley de Lorentz. Poincaré reformuló las transformadas de Lorentz utilizando una notación que implicaba una unificación del tiempo y el espacio, introdujo el concepto de "tiempo local y afirmó que las leyes de la física deben ser las mismas en todos los sistemas de referencia inerciales. Estos conceptos fueron plasmados poco después por Einstein en su trabajo de 1907 sobre relatividad especial. Minkowski aclara cómo se relacionan entre sí las coordenadas de diferentes sistemas de referencia inerciales afinando las transformadas de Lorentz, pudiendo deducir de ellas: la dilatación del tiempo, la contracción de longitud y la relatividad de la simultaneidad.

Este trabajo tratará los distintos puntos de vista del mundo científico, de cómo relacionaron sus ideas entre sí, formando teorías aceptadas hoy en día, descartando otras y dejando algunas en tierra de nadie, donde una parte de la comunidad sí las consensua y la otra parte no está satisfecha con ellas.

## Precedentes

La electricidad y el magnetismo son fenómenos de los que tenemos constancia desde hace más de 2000 años. En la antigua Grecia vivió un hombre que se percató de ambos efectos y ese hombre fue Tales de Mileto (624 a.C. - 546 a.C.), quien dejó constancia de sus observaciones:

- Si se frotaba una piedra de ámbar esta podría atraer ciertos objetos livianos en el aire, conocida actualmente como electricidad estática. Se debe a que en la fricción, el ámbar queda cargado negativamente, atrayendo así los objetos con cargas positivas.
- En la ciudad de Magnesia, existían piedras que ejercían fuerzas entre sí. Son imanes naturales.

En el siglo XVIII, ya existían reportes de marineros en el “Philosophical Transactions” de como los rayos producían efectos magnéticos, además de electricidad, luz y calor, porque se desviaban las brújulas de los barcos a consecuencia de estos. También hay constancias de como Benjamin Franklin (1706 - 1790) había imantado agujas descargando sobre ellas la electricidad que contenían las botellas de Leyden<sup>i</sup> (Martins, 1986).

Un gran paso para dar respuestas a estos fenómenos fue la creación de la pila voltaica, por el físico italiano Alessandro Volta en 1800, la cual convertía energía química en energía eléctrica. Su diseño se basa en conectar exteriormente los electrodos ánodo (zinc) y cátodo (cobre), ambos sumergidos en un electrolito, creando una corriente producida por la reacción redox que ocurría dentro de la pila. Este invento será muy relevante en los experimentos que relacionarán electricidad y magnetismo.

En la época de Oersted, se conocía gracias a Coulomb que la fuerza resultante entre dos cargas estacionarias es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa, la cual tienen un gran parecido a la ley de gravitación universal de Newton, acentuando el pensamiento clásico de la época de que todo estaba relacionado bajo una premisa y dando una explicación a como las cargas de signos opuestos se atraen y las de mismo signo se repelen, contestando a la observación de Tales sobre el fenómeno del ámbar (Martins, 1986).

## Oersted descubre la relación entre magnetismo y electricidad

Se utilizará la siguiente bibliografía para explicar los experimentos, resultados y conclusiones de Oersted<sup>1</sup>:

- “Expériences sur l'effet du conflict électrique sur l'aiguille aimantée” por Hans Christian Ørsted (1820).
- “Ørsted e a descoberta do eletromagnetismo” por Roberto de Andrade Martins (1986). “
- “Ampère jette les bases de l'électrodynamique” por Christine Blondel y Bertrand Wolff (2009a).
- “Speculation and Experiment in the Background of Oersted's Discovery of Electromagnetism” por Robert C. Stauffer (1957).
- “El concepto de estado electro-tónico en Faraday” por José Romo Feito (1991).

Oersted creía firmemente en la existencia de un conflicto eléctrico entre dos fuerzas opuestas, electricidad positiva y electricidad negativa, que se relacionan entre sí tanto en el conductor como en el espacio que le rodea, dificultando su detección (Stauffer, 1957).

Su investigación le llevo a cerrar el circuito externo con dos finalidades:

- 1) Comprobar la reacción en el interior de la pila.
- 2) Observar el conflicto eléctrico en el conductor.

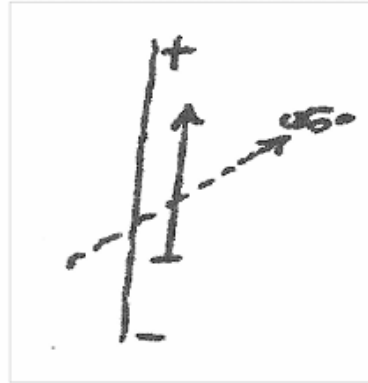
Buscando mejoras en la pila (tensión) y en la transmisión de los conductores (resistencia), aumentó la corriente y los campos magnéticos de esta.

En 1820 se da cuenta de que un conductor por el que circula corriente desviaba una brújula magnética que se encontraba al lado. Realizó diferentes tipos de experimentos con el fin de estudiar la relación entre magnetismo y electricidad. Su experimentación se basó en hacer circular corriente por un hilo conductor hasta la incandescencia para así observar la desviación de una brújula cercana al hilo, siendo esta desviación muy leve, lo que no le convenció. Meses más tarde probaría con pilas de mayor potencia y conductores de mayor sección, lo que aumento la corriente que circulaba, aumentando así al campo magnético. Tras ello observo que la aguja magnética se desviaba hasta formar casi un ángulo recto con el cable.

---

<sup>1</sup> **Hans Christian Oersted** (1777 - 1851) fue un físico y químico danés y el primero en observar la relación entre magnetismo y electricidad.

Oersted decide comprobar cómo afecta a una aguja magnética un conductor por el que pasa corriente eléctrica, en distintas posiciones. Colocando el conductor sobre la brújula, conceptualmente lo entendemos como la corriente yendo de positivo a negativo es la que genera un campo magnético circular con sentido horario que desvía la aguja (Øersted, 1820).



*Ilustración 1: Desviación de una aguja magnética en presencia de una corriente eléctrica (Oersted 1820)*

Para los experimentos observó que cambiando el sentido de la corriente o las posiciones relativas de arriba a abajo y de izquierda a derecha, el sentido giro de la aguja también lo hacía. Tras ello postuló que la electricidad negativa desviaba polo sur de la aguja y la electricidad positiva el polo norte de la aguja (Øersted, 1820).

A Oersted se le ocurrió enrollar el conductor teniendo así una bobina, por la que hizo circular corriente eléctrica y a la que acercó un imán. Observó que las fuerzas que ejercían solo podían explicarse si la bobina tenía un comportamiento idéntico al de un imán, siendo un extremo el polo norte y el otro extremo el polo sur arriba (Ørsted, 1820).

Los resultados de los experimentos se publicarían el 21 de Julio de 1820, en el escrito "*Experimenta circa effectum conflictus electri in acum magneticam*". En agosto de ese mismo año se replicaron los experimentos en Ginebra, los cuales fueron presenciados por François Arago<sup>2</sup>. Después de realizar los experimentos por su cuenta, Arago dio una serie de conferencias del 4 al 11 de septiembre. dejando muy sorprendido a André-Marie Ampère<sup>3</sup>.

---

<sup>2</sup> **François Arago** (1786-1853) fue un matemático, físico y astrónomo francés del que cabe destacar su gran habilidad en la creación de experimentos

<sup>3</sup> **André-Marie Ampère** (1775-1836) fue un matemático y físico francés del que hay que mencionar su excelencia en el campo matemático.

## Ampère y Arago, y la tercera ley de Newton

Se utilizará la siguiente bibliografía para explicar los experimentos, resultados y conclusiones de Ampère y Arago:

- "Memoria presentada a la Real Academia de Ciencias el 2 de octubre de 1820, que incluye un resumen de lo que se había leído a la misma Academia el 18 y 25 de septiembre de 1820, sobre los efectos de las corrientes eléctricas. Continuación de la memoria sobre la acción mutua entre dos corrientes eléctricas, una corriente eléctrica y un imán o el globo terrestre, y entre dos imanes" (1820); "Carta del 15 de agosto dirigida a Speyert van der Eyk" (1821); "Recopilación de observaciones electrodinámicas, que contiene varios Memorias, notas, extractos de cartas o de obras periódicas sobre las ciencias, relacionadas con la acción mutua de dos corrientes eléctricas, la que existe entre una corriente eléctrica y un imán o la tierra, y la de dos imanes uno sobre el otro" (1822) y "Théorie mathématique des phénomènes électrodynamiques uniquement déduit de l'expérience" (1827) por André-Marie Ampère.
- "Expériences sur les courants électriques produits par l'influence d'un autre courant" (1821) por André-Marie Ampère y Antonie-César Becquerel.
- "Notes relatives au mémoire de M. Faraday" (1821) por André-Marie Ampère y Félix Savary.
- "Ampère jette les bases de l'électrodynamique" (2009a) por Christine Blondel y Bertrand Wolff.
- "Las teorías de los campos de fuerza. Desde Faraday hasta Einstein." (1985) William Berkson.
- "What were Ampere's earliest discoveries in electrodynamics?" (1983) por L. Pearce Williams.
- "Looking for a "Simple Case": Faraday and Electromagnetic Rotation" (1995) por Friedrich Steinle.
- "Ampère, Electrodynamics and Experimental Evidence" por James R. Hoffmann (1987)

Tras la conferencia, Arago y Ampère se embarcaron en una investigación más profunda sobre las hipótesis de Oersted. Por un lado, Ampère pensaba que la electricidad y el magnetismo eran independientes.



En un primer momento, Ampère quería apreciar cuanta influencia tenía el conductor cargado sobre la aguja despreciando el campo magnético terrestre. Para ello construyó la brújula astática, la cual inclinaba la aguja hasta poner su eje de giro paralelo a las líneas de fuerza del campo magnético y evitando la desviación pasando los extremos de la aguja por una guía circular, manteniendo cualquier posición otorgada a la aguja hasta que se vea afectada por un campo magnético ajeno al terrestre (Blondel & Wolff, Ampère jette les bases de l'électrodynamique, 2009a).

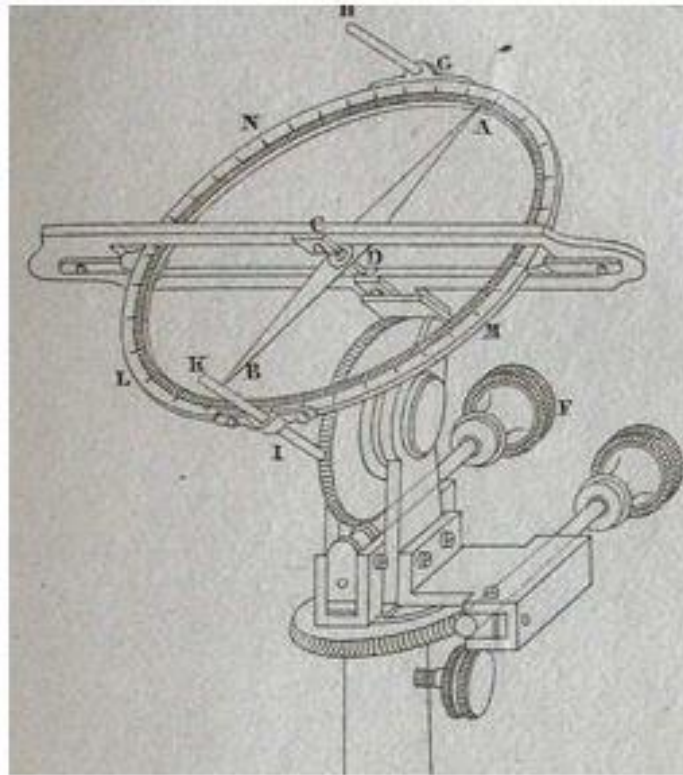


Ilustración 2: Brújula astática (Ampère A.-M. , Memoria, 1820))

El campo magnético de la tierra atraviesa la aguja magnética en dirección al eje sobre de giro de la aguja, lo que hace que la aguja no experimente ninguna fuerza que favorezca el giro, sino que el movimiento es de cabeceo hacia arriba o hacia abajo, buscando alinearse con el campo magnético, pero no es posible ya que la aguja tiene sus extremos dentro de una guía que no permite el cabeceo de la aguja. Teniendo el campo magnético terrestre contrarrestado, la aguja queda “libre” de interacción para poder experimentar con el campo magnético de un conductor cargado. Como en los experimentos de Oersted, las líneas de campo buscan alinearse, pero en este caso no cuenta con la desviación del campo terrestre, lo que permite la alineación completa, formando la aguja y el cable un ángulo de  $90^\circ$  (Ampère A.-M. , Memoria, 1820).

El resultado fue el esperado por Ampère, siendo la desviación de la aguja 90°. También se percató que este experimento serviría para medir la corriente eléctrica, siendo el precursor del galvanómetro<sup>ii</sup>. Expuso de manera oral los resultados entre el 18 y 25 de septiembre (Blondel & Wolff, Ampère jette les bases de l'électrodynamique, 2009a).

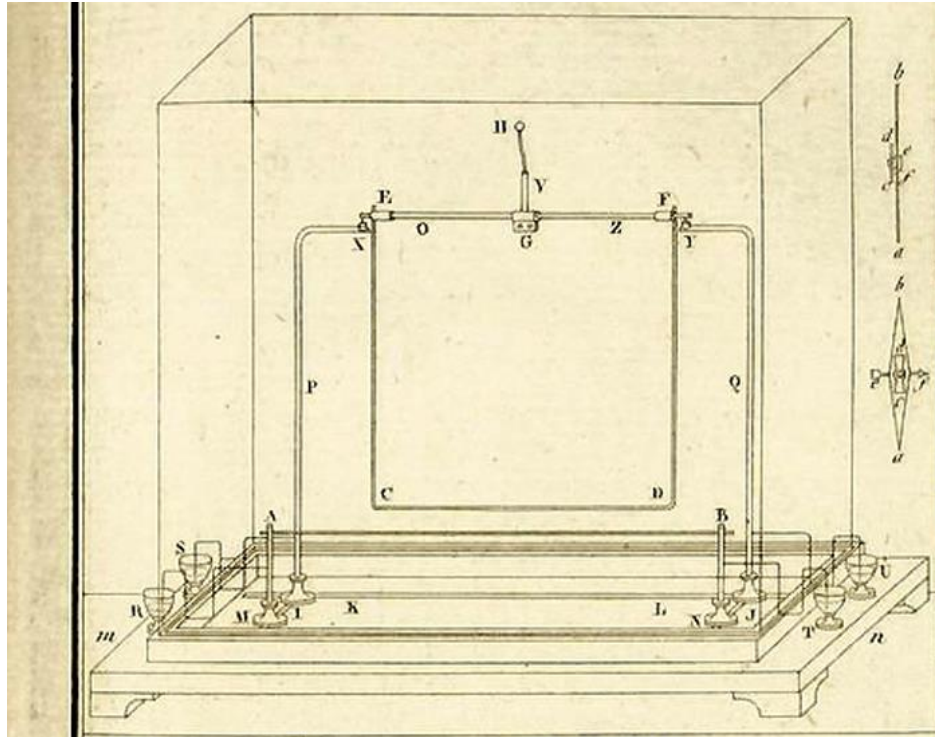
Considera que existen dos fenómenos diferentes en la electricidad, las actualmente conocidas como corriente y tensión, debido a que tanto una pila como una máquina eléctrica a fricción presentan:

- (Tensión). Un circuito abierto genera electricidad estática, atrayendo cuerpos ligeros y desviando el electrómetro<sup>iii</sup>. Esto denota que ambos artilugios separan las cargas positivas y las negativas. Se produce una desviación del electrómetro porque existe diferencia de potencial al no estar en contacto los polos de la pila.
- (Corriente). Realizando el experimento de un conductor cargado que desvía una brújula, midió la tensión conectando el electrómetro en ambos polos viendo que era nula. Atribuye a este efecto la responsabilidad del magnetismo y la generación de calor. Surge en él la idea de corriente como un caudal de la electricidad. No existe desviación en el electrómetro ya que ambos polos están unidos por un conductor que prácticamente no genera pérdidas debido a que su resistencia es casi cero, lo que hace que la diferencia de potencial sea nula.

Ampère se percató que la aguja también era desviada por la influencia de la pila, deduciendo que dentro de esta debía de existir una circulación de corriente para producir la desviación. Esto contradecía la hipótesis sobre electroestática, la cual decía que entre dos metales (Zinc y Cobre), sumergidos en un fluido y separados entre sí, existe una tensión y que poniendo en contacto dichos polos por medio de un conductor produce la separación de los fluidos eléctricos que van de polo a polo pasando por el conductor y no por la pila, pero con esta demostración Ampère deja constancia de que la corriente circula por un circuito cerrado (Williams, 1983).

Ampère sabía el modo en como interactúan los imanes entre sí, y tras ver la similitud de interacción con un conductor cargado eléctricamente y un imán, se dispuso a comprobar el comportamiento entre dos conductores cargados.

a) Interacción entre dos conductores paralelos.



*Ilustración 3: Balanza de Ampère (Ampère A.-M. , Memoria, 1820)*

La balanza consta de dos conductores paralelos entre sí, por los que pasa corriente eléctrica (AB y CD). El conductor CD está apoyado sobre E y F, los cuales permiten giro en el eje EF, como si de un columpio se tratara. Además, CD está alimentado por las barras P y Q. Cuando el sentido de las corrientes es idéntico, el conductor CD se acerca a AB y si los sentidos de corriente son distintos se aleja, mostrando un carácter de atracción y de repulsión similar al de los imanes (Ampère A.-M. , Memoria, 1820)

b) Solenoides.

Posteriormente enrolló el conductor a una barra de hierro, creando un solenoide con núcleo ferromagnético. Enfrentando los extremos de dos solenoides observó los mismos resultados de atracción y repulsión que en el caso de las bobinas, teniendo algún caso con efectos magnéticos más pronunciados (Blondel & Wolff, Ampère jette les bases de l'électrodynamique, 2009a). Lo más curioso de este experimento es que el material quedaba magnetizado aun después de dejar de ejercer corriente eléctrica. Ampère explicó que se producía por la corriente de la bobina que provocaba corrientes en el mismo sentido en el acero (Hofmann, 1987).

Tras las primeras experiencias, Ampère sugiere que los imanes permanentes deben contener corrientes eléctricas. Pensaba en la corriente eléctrica como responsable del magnetismo, y tras esta fase de experimentación, debido a la similitud de comportamiento, determinó que por un imán debían circular

corrientes eléctricas de polo a polo, paralelamente a su eje y cerrándose sobre ellas mismas sin cortarse entre sí, describiendo a la perfección las líneas de campo magnético, pero con un agente incorrecto, la corriente eléctrica (Blondel & Wolff, Ampère jette les bases de l'électrodynamique, 2009a).

Para Ampère debía de existir una ley general que pudiera explicar el fenómeno del experimento de los dos conductores, y esta ley debía de tener un planteamiento teórico y una base matemática que lo respalde. Ampère deduce que se deben cumplir:

- La tercera ley de Newton. La fuerza resultante toma la dirección que une recta los conductores cargados.
- La fuerza resultante (atractiva o repulsiva) debe ser proporcional a las intensidades que recorren los conductores e inversamente proporcional a la distancia que los separa.
- Si ambas corrientes circulan en el mismo sentido la fuerza es atractiva y si los sentidos son opuestos la fuerza resultante es repulsiva.

Fuerza de Ampère:

$$d^2\vec{F} = \frac{\mu_0 \cdot I_i \cdot I_j}{4\pi} \cdot \frac{\hat{r}_{ij}}{r_{ij}^2} [3(d\vec{r}_i \cdot \hat{r}_{ij})(d\vec{r}_j \cdot \hat{r}_{ij}) - 2(d\vec{r}_i \cdot d\vec{r}_j)]$$

La dificultad residía en plantear una ecuación de análisis infinitesimal extrapolado de la experiencia de los circuitos reales, sumado a problemas de salud y laborales hizo que no completara su trabajo hasta 1826 publicando: *"Teoría matemática de los fenómenos electrodinámicos deducidos únicamente de la experiencia"* (Blondel & Wolff, Ampère jette les bases de l'électrodynamique, 2009a).

Unos pocos científicos no estaban de acuerdo con las teorías del calórico y la óptica corpuscular, como Arago, Fresnel<sup>4</sup> y Fourier<sup>5</sup>; pero con la electricidad y el magnetismo no hubo objeciones hasta 1820 (cf. Hofmann 1987).

Ampère tras experimentar similitud de comportamiento entre bobinas e imanes sostenía que los fenómenos eléctricos y magnéticos eran indistinguibles y que estos últimos eran consecuencia de corrientes eléctricas, incluyendo al magnetismo como un fenómeno electrodinámico, apartándolo de la teoría de fluido imponderable (Ampère A.-M. , *Théorie mathématique des phénomènes électro dynamiques uniquement déduit de l`expérience*, 1827).

---

<sup>4</sup> **Augustin-Jean Fresnel** (1788-1827) fue un físico francés que contribuyó a la teoría de óptica ondulatoria.

<sup>5</sup> **Jean-Baptiste Joseph Fourier** (1768-1830). Matemático y físico francés conocido por la Series de Fourier.

Ampère recoge en su publicación una ley, redactada por Laplace basada en las experiencias de Biot, similar a la que el postuló sobre interacción entre conductores, pero en este caso se tiene en cuenta la interacción de un conductor con una molécula magnética. Pero al contrario que Biot y Laplace no estaba de acuerdo con la teoría de fluido magnético, por ello atribuyó origen eléctrico a los siguientes casos de fuerzas atractivas y repulsivas (Ampère A.-M. , *Théorie mathématique des phénomènes électro dynamiques uniquement déduit de l`expérience*, 1827):

1. Entre cargas. Investigadas por Coulomb<sup>6</sup> en el terreno de la electroestática.
2. Entre imán y conductor cargado. Investigadas por Biot, Savart y Laplace.
3. Entre dos circuitos eléctricos. Investigadas por Ampère.

Ampère postuló que todos los casos podían explicarse considerando a los imanes como pequeños circuitos eléctricos, como en el caso 3, debido a que:

- Todas estas fuerzas son inversamente proporcionales al cuadrado de sus distancias.
- En el caso 2 interactúan elementos de distinta naturaleza, por lo atribuyó a la electricidad la creación del magnetismo, y no al revés.

Trabajando en paralelo se encontraba Arago, además de ayudar a Ampère en la tarea constructiva de los experimentos. Arago en los dos primeros años de investigación tras la conferencia de 1820 y basándose en los modelos de solenoides y bobinas de Ampère, comenzó a pensar en la relación entre rotación y magnetismo. Por ello, los dos siguientes años estaría investigando el comportamiento de una aguja imantada en movimiento interaccionando con varios materiales, publicando sus resultados en 1825 en "*Annales de chimie et de physique*".

El experimento que cabe destacar fue el Disco de Arago, el cual era un disco de cobre y un imán en forma de barra, los cuales compartían eje de giro (vertical), girando libremente uno respecto del otro, sin contacto entre sí. Cuando Arago giró el disco, el imán comenzó a girar también. Teniendo en cuenta que el cobre es un material no magnético, y que no había presencia de ningún tipo de electricidad en el disco. Tras la publicación, Babbage<sup>7</sup> y Herschel<sup>8</sup> realizan el experimento al revés, girando el imán para hacer girar el

---

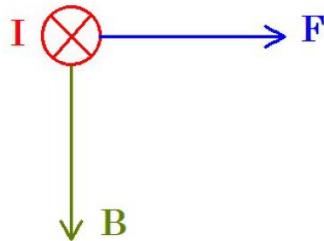
<sup>6</sup> **Charles-Augustin Coulomb** (1736-1806) fue un ingeniero y físico francés, destacado por el estudio de las fuerzas eléctricas, magnéticas, de rozamiento y la resistencia de materiales.

<sup>7</sup> **Charles Babbage** (1791-1871) fue un matemático británico y precursor de la computación.

<sup>8</sup> **John Frederick William Herschel** (1792-1871) fue un matemático y astrónomo inglés, conocido por descubrir la región infrarroja del espectro electromagnético.

disco, teniendo resultados positivos, pero solo con materiales que son buenos conductores de electricidad. Babbage y Herschel especulan que el imán induce magnetismo de polaridad contraria al suyo, atrayéndose entre sí y produciendo el giro del disco (Steinle, 1995).

El cobre en presencia de un flujo magnético variable sufre inducción. En este caso, en todo momento la superficie atravesada por el campo magnético, pese a tener las mismas dimensiones, va variando su región, aumentando el flujo magnético cuando aparece en la región del cobre y disminuyendo a su salida, induciendo corrientes de giro de sentido opuesto, conocidas como corrientes de Foucault. Las corrientes inducidas serán lo que detecte el galvanómetro. Las corrientes inducidas en el disco interactúan a su vez con el campo magnético del imán, generando una fuerza que hace girar el disco.



*Ilustración 4: Fuerza experimentada por el disco por la interacción de las corrientes de Foucault y el campo magnético del imán.*

## Biot y Savart, estudiando los efectos de una corriente sobre un imán.

Los conocimientos de los efectos de una corriente sobre un imán serán obtenidos de: “Ley de Biot Savart” por Antom (2015 <http://leydebiotysavart.blogspot.com/> )

Después de las primeras presentaciones de los experimentos de Ampère en 1820, Biot y Savart realizaron un experimento para investigar cómo la corriente eléctrica en un conductor afecta al campo magnético que lo rodea. En su experimento, pasaron una corriente eléctrica a través de un conductor largo y recto, como un alambre, y luego midieron el campo magnético en varios puntos alrededor del conductor utilizando una brújula u otro dispositivo de medición magnética. Al realizar mediciones en diferentes distancias y ángulos alrededor del conductor, pudieron establecer una relación entre la corriente eléctrica en el conductor y el campo magnético generado. Este experimento fue fundamental para la formulación de la Ley de Biot-Savart, que describe cuantitativamente cómo la corriente eléctrica en un conductor afecta al campo magnético en su entorno. La ley de Biot-Savart se basa en la observación experimental de que la intensidad del campo magnético es proporcional a la corriente eléctrica y al inverso de la distancia desde el conductor. A partir de estas experiencias deducen el planteamiento matemático (Atom, 2015).

### Ley de Biot-Savart

$$d\vec{B} = \left(\frac{\mu_0}{4\pi}\right) * \frac{(I d\vec{l} \times \hat{r})}{r^2}$$

$B$ : Campo magnético o (Tesla) [ $T = N \cdot A^{-1} \cdot m^{-1}$ ]

$\mu$ : Permeabilidad magnética del medio [ $T \cdot m/A$ ]

$I$ : Intensidad por  $d\vec{l}$  [ $A = C/s$ ]

$d\vec{l}$ : Longitud del elemento de corriente [m]

$r$ : Distancia hasta el punto a analizar [m]

La idea de concebir el magnetismo como un fluido independiente contradice la idea de Ampère de que el fenómeno del magnetismo es producido exclusivamente por corrientes eléctricas.

## Faraday y Henry descubriendo la inducción electromagnética

Se utilizará la siguiente bibliografía para explicar los experimentos, resultados y conclusiones de Faraday:

- “Historical Sketch of Electro-magnetism” (1821-1822); “On some new Electro-Magnetical Motions, and on the theory of Magnetism” (1822a); “Carta de Faraday a Ampère” (1843); “Experimental Researches in Electricity” (1832a) y “The Bakerian Lecture: Experimental Researches in Electricity” (1832b) por Michael Faraday.
- “Faraday, Ampère, et le mystère des rotations continues.” (2011) por Christine Blondel y Bertrand Wolff.
- “Las teorías de los campos de fuerza. Desde Faraday hasta Einstein.” (1985) William Berkson.
- “El concepto de estado electro-tónico en Faraday” (1991) por José Romo Feito.
- “The Search for Electromagnetic Induction: 1820-1831” (1965) por Sidney Ross.
- "The Scientific Letters and Papers of Joseph Henry" (1972) Nathan Reingold.

El descubrimiento de Oersted cruza el canal de la Mancha hacia Inglaterra en octubre de 1820, donde Faraday<sup>9</sup> repite los experimentos. Tras ello, y por consejo de un amigo suyo, Faraday se embarca en el análisis de todo lo concerniente al terreno del electromagnetismo, presentando su *trabajo* “*Historical Sketch of Electro-magnetism*” en tres partes: octubre y septiembre de 1821 y en febrero de 1822. Faraday pone en duda que la electricidad este formada por uno o dos fluidos eléctricos como sostenía Oersted y cree que el conflicto eléctrico pese a intentar dar con la relación entre magnetismo y corriente, es un concepto muy confuso (Berkson 1985) y del trabajo de Ampère critica la ausencia de una definición precisa sobre la corriente eléctrica pese a que su estudio defiende que estas son el origen del magnetismo (Feito, 1991).

Faraday replica el experimento de Oersted añadiendo otras posiciones relativas entre la aguja y el conductor, obteniendo resultados más detallados del fenómeno. Posicionó la aguja y el conductor en el plano horizontal, pero perpendiculares entre sí y haciendo pasar el conductor cerca de cada extremo de la aguja. En la Ilustración 5 podemos observar los resultados de Faraday,

---

<sup>9</sup> **Michael Faraday** (1791-1867) fue un científico del siglo XIX, reconocido por sus investigaciones en electromagnetismo y electroquímica.



suponiendo que la corriente sale del dibujo y el polo norte magnético está determinado por la flecha. Las respuestas de la aguja, tanto si el conductor pasaba por abajo como por encima de la misma, eran idénticas, es decir, por arriba la aguja sufría repulsión (R) y por debajo atracción (A), haciendo que siempre se inclinara hacia abajo el extremo donde estaba el conductor. También se percató que, a partir de cierta distancia entre el centro y el extremo de la aguja, la aguja comenzaba a dar una respuesta contraria. Esto le incitó a pensar que los polos verdaderos de los imanes se encontraban ligeramente desviados hacia el centro de cada extremo (Berkson, 1985).

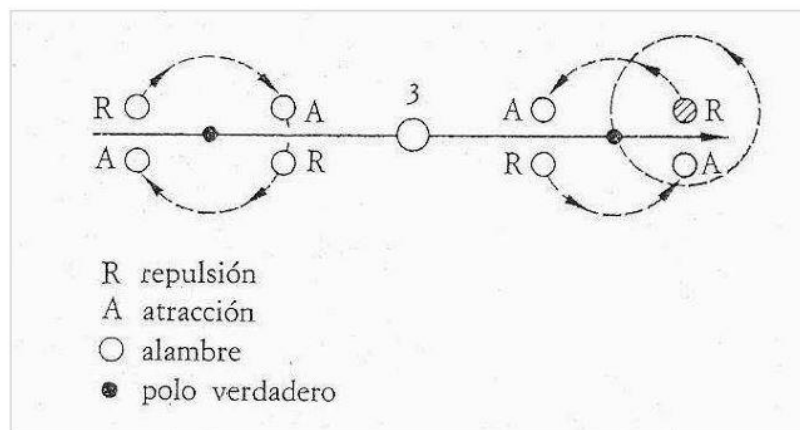


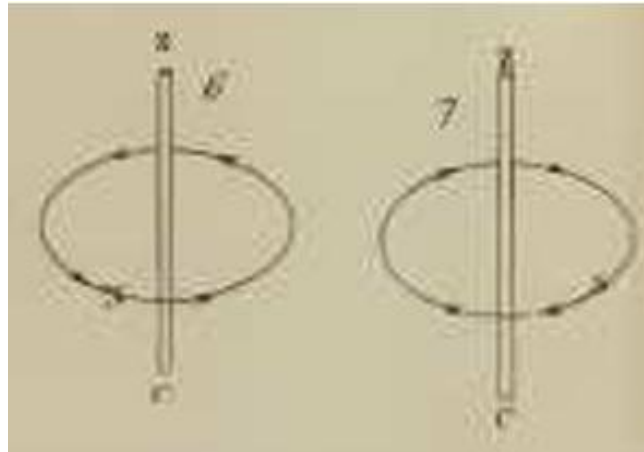
Ilustración 5: Figura 3 del artículo de Faraday reproducida por Berkson (Berkson, 1985).

“La dirección en la que el alambre se mueve depende de la forma en que se realizaran las conexiones, y del polo magnético puesto en acción. Cuando se conecta la parte superior del alambre con la placa de zinc de la batería, y la inferior con la placa de cobre, el movimiento alrededor de los polos norte y sur del imán fueron como se muestran en las figuras 4 y 5, mirando desde arriba. Cuando las conexiones se invierten, el movimiento del cable alrededor del polo es en la dirección opuesta [...]



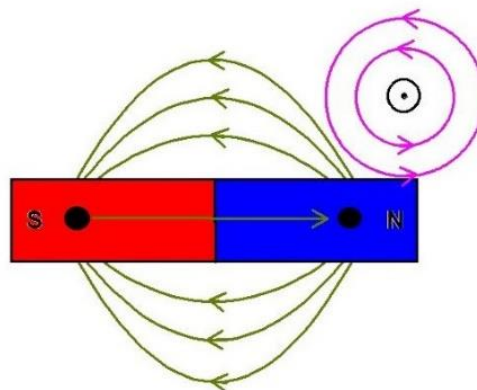
Ilustración 6: Movimiento de un alambre cargado en presencia de un campo magnético norte y otro sur (Faraday 1822 Fig. 4 y 5)

[...] El siguiente objetivo era hacer que el imán girara alrededor del alambre... Los movimientos nuevamente resultaron de acuerdo con el polo activo y la manera de hacer las conexiones. Cuando la parte superior del alambre estaba en contacto con la placa de zinc, y la inferior con el cobre, la dirección de la curva descrita por los polos norte y sur fueron como en las figuras 6 y 7. Cuando se invirtieron las conexiones, los movimientos de los polos alrededor del cable estaban en las direcciones opuestas” (Faraday 1822, p. 78)



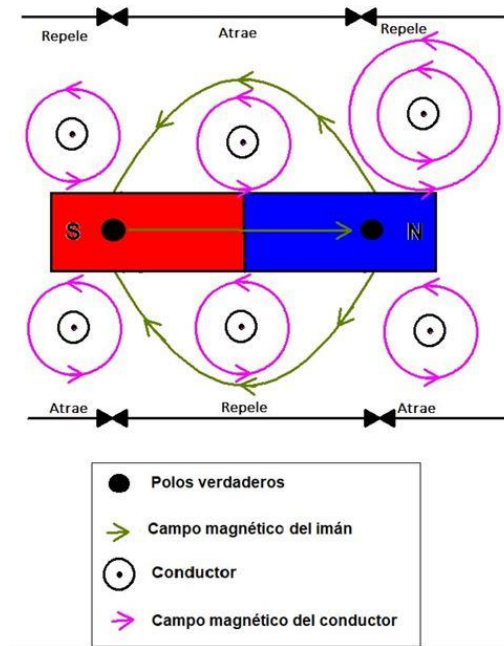
*Ilustración 7: Movimiento de un imán en presencia de una corriente eléctrica, para ambos sentidos (Faraday 1822 Fig. 6 y 7)*

Si analizamos lo que ocurre en la Ilustración 5, sabiendo que el campo magnético generado por el conductor tiene sentido circular antihorario, y que las líneas de campo magnético generadas por un imán salen por su polo norte y entra por su polo sur, tendríamos la siguiente disposición:



*Ilustración 8: Representación del sentido de las líneas de campo magnético de un caso*

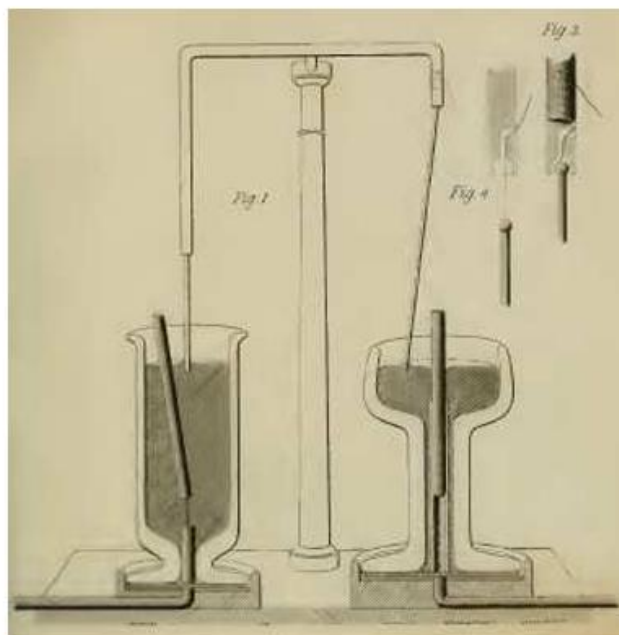
Visualmente se puede explicar el comportamiento de la aguja tomando como entrada y salida de las líneas de campo magnético los polos verdaderos, las cuales buscan alinearse con las del conductor.



*Ilustración 9: Representación de todos los casos.*

Podemos ver, en la *Ilustración 9*, la dirección y sentido de las líneas de campo del imán y del conductor, siendo atraídos entre sí cuando fluyen en el mismo sentido y repelidos cuando no. No será hasta 1831 que Faraday empleó el concepto de líneas de fuerza magnética.

También incluyó en la revista “The quarterly journal”, un experimento sobre rotaciones electromagnéticas. En la *Ilustración 10* podemos ver el diseño del experimento.



*Ilustración 10: Experimento de rotación electromagnética (Faraday 1821 Fig. 1, 3 y 4)*

Los dos recipientes contienen mercurio y están conectados entre sí por medio de conductores cobre que se encuentran en la parte superior de los respectivos recipientes para permitir el paso de electricidad. En el recipiente de la izquierda hay un imán en forma de barra sumergido en mercurio, sujeto de un extremo en el fondo del recipiente y libre el otro extremo, permitiéndole girar describiendo un cono invertido en su movimiento, mientras que el conductor se encuentra inmóvil. En el recipiente de la derecha el imán sumergido está inmóvil y en posición vertical, mientras que el cable se encuentra sujeto por su extremo superior y su otro extremo libre en el mercurio permitiéndole girar describiendo un cono. El giro del cable estando conectado sin que rompa es debido a que el extremo superior es una bolita que encaja en una cavidad esférica, similar a la función del sistema de escobillas.

El funcionamiento reside en que la corriente que circula por ambos conductores interacciona con los respectivos polos de los imanes. Para los dos casos, el campo producido por los polos de los imanes sale o entra (polo norte o polo sur), interaccionando con el conductor perpendicularmente a la dirección de la corriente. Analizando matemáticamente:

$$\vec{F}_m = I \cdot (\vec{L} \times \vec{B})$$

$F$ : Fuerza experimentada por el conductor [ $N$ ]

$I$ : Intensidad [ $A$ ]

$L$ : Longitud del conductor [ $m$ ]

$B$ : Campo magnético de la bobina [ $T = N \cdot A^{-1} \cdot m^{-1}$ ]

Vemos que la fuerza resultante es perpendicular a la intensidad y al campo magnético, es decir, una fuerza tangente a la circunferencia descrita en los respectivos conos imaginarios. Esta fuerza es la que produce el giro.

Tras los experimentos, Faraday se opone a la idea de Ampère sobre que estos fenómenos se producían en la línea que unía los elementos de corriente, y postula que la interacción es en realidad una rotación electromagnética demostrándolo tanto con el imán girando alrededor de un conductor por el que circula corriente como con el conductor girando alrededor de un imán. Ampère pudo dar respuesta a las experiencias de Faraday aplicando la resultante de fuerzas, explicando todos los fenómenos conocidos en los que se podía aplicar el cálculo integral hasta la fecha (Berkson, 1985).

Tras el descubrimiento de Oersted de como una corriente eléctrica genera magnetismo, algunos científicos comienzan a cuestionarse si un imán podía generar una corriente eléctrica, surge la idea de inducción magnética.

El primero fue Fresnel, quien razonó que, si una barra de hierro rodeada por una bobina por la que circula corriente eléctrica se magnetiza, un imán en el interior de la bobina crearía una corriente eléctrica en la bobina. Tras realizar el experimento dijo ver como se descomponía el agua por medio de una corriente inducida, pero acabo retractándose. El fracaso del experimento puede explicar con la Ley de Lenz, la cual dice que la fuerza electromotriz inducida es derivada del flujo magnético respecto del tiempo, siendo esta cero porque el flujo es constante. Esto se produce dejando el imán estático en el interior de la bobina.

Ampère, después de un primer fracaso, encontró, junto con Rive<sup>10</sup>, pruebas del fenómeno de inducción. El experimento estaba formado por un anillo de cobre en el interior de una botella de vidrio, la cual permitía movimiento del anillo de cobre y evitaba el contacto con otro anillo exterior por el que circula una corriente muy elevada, y en frente de ambos anillos se encuentra un potente imán. Rive realizó el análisis del experimento describiendo como el anillo de cobre, el cual ni es magnético ni estaba electrificado, se movía en el interior del vidrio en presencia de una corriente eléctrica externa y el imán. La explicación es que el anillo por el que circula corriente elevada provoca un campo magnético que induce corrientes en el anillo interior, la cuales crean un campo magnético inducido que se opone en sentido al campo magnético exterior. Esto genera que el anillo interior magnetizado interaccione con el imán atrayéndose o repeliéndose, dependiendo del sentido de la corriente que circula por el anillo exterior que la que dará un sentido u otro al campo inducido. Pese a ello, la publicación realizada por Rive al respecto no dio importancia al efecto, lo que se tradujo en la misma respuesta por parte de la comunidad científica. Además, Ampère pese a tener su propia redacción acerca del experimento, decidió no publicar debido a que ya lo había hecho su compañero (Ross, 1965).

Faraday es uno de los mayores investigadores sobre electromagnetismo, publicando en 1832 la primera de una serie de investigaciones que duraría los siguientes 25 años, conocidas como “Experimental researches in electricity”.

---

<sup>10</sup> **Auguste de la Rive** (1801-1873) fue un prominente físico y meteorólogo conocido por sus contribuciones a la física, especialmente en el campo de la electricidad y el electromagnetismo.

De los primeros experimentos detallados en su publicación de 1832 cabe destacar los que presentan el fenómeno de inducción electromagnética o magnetoeléctrica como denominó Faraday:

- Inducción eléctrica de una bobina a otra. En este experimento enrolló dos bobinas sobre si mismas sin contacto entre sí, conectando una de ellas a una pila y la otra a un galvanómetro, con el fin de ver si la bobina cargada eléctricamente inducía corriente en la otra, visualizándolo en el movimiento del galvanómetro. Probó con distintos conductores y pilas más potentes pero el experimento resultó negativo debido a que el flujo magnético permanecía constante. Pese a ello, observó que en la conexión y desconexión de la pila el galvanómetro oscilaba.

La explicación reside en que la corriente de una bobina aumenta hasta que se carga por completo cuando se conecta a la batería y cuando se desconecta se descarga hasta cero en un determinado tiempo. Esta corriente variable crea un campo y flujo magnético también variable. Dicho flujo variable de la primera bobina induce una fuerza electromotriz en la otra bobina y, por tanto, se produce una corriente inducida que puede percibir el galvanómetro cuando conecta o desconecta la pila.

#### Ley Faraday-Lenz:

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt} \cdot N$$

$\varepsilon$ : fem (Voltios) [V]

- Dos bobinas enrolladas a un anillo de hierro. Una de las bobinas, conectada a una batería, enrolla medio anillo de hierro y la otra mitad es enrollada por la otra bobina que es conectada a un galvanómetro. El galvanómetro solo oscila cuando se conecta y desconecta la batería siendo la causa de ello la misma que en el experimento anterior.

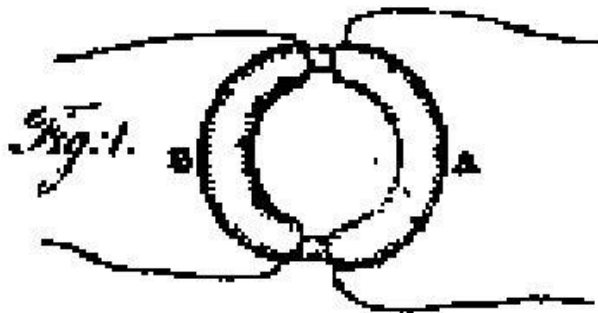


Ilustración 11: Anillo con dos bobinas (Faraday 1832 Fig. 1)

La bobina tarda en cargarse y descargarse de corriente eléctrica un tiempo determinado cuando se conecta y desconecta, respectivamente, lo que genera un flujo magnético variable en ese tiempo determinado. Dicho flujo variable recorre todo el hierro, el cual creará una corriente inducida en la otra espira. Podemos ver en este experimento el concepto de un transformador en miniatura.

- Interacción entre bobina e imán. Por el interior de una bobina enrollada a un tubo de cartón y conectada a un galvanómetro se introduce un imán. Faraday vio que, estando el imán inmóvil, el galvanómetro no oscilaba, pero si oscilaba en un sentido cuando el imán entraba, y en sentido contrario cuando salía (Faraday, Experimental researches in electricity, 1832a). También puede explicarse porque al introducir o sacar el imán estamos creando un campo magnético variables, y por tanto un flujo magnético capaz de inducir corriente eléctrica.
- Interacción entre dos conductores en movimiento. Utilizó dos conductores en forma de W sobre dos tablas, los cuales podían acercarse y alejarse sin tocarse entre sí. Uno de los conductores estaba conectado a una batería y el otro a un galvanómetro. Observó que cuando los conductores se acercaban el galvanómetro oscilaba en un sentido, cuando se alejaban oscilaba en el sentido contrario y cuando estaban en reposo no oscilaba. También se percató que a mayor velocidad acercando o alejando los dos conductores, mayor era la oscilación en el galvanómetro (Faraday, Experimental researches in electricity, 1832a). Debido a que existe variación de flujo magnético, por el movimiento relativo entre los alambres, existe una corriente inducida, y a mayor velocidad, mayor corriente.

*“Cuando los alambres se aproximaban, la corriente inducida era de sentido contrario a la corriente inductora. Cuando los alambres se alejaban la corriente inducida era del mismo sentido que la corriente inductora. Cuando los alambres permanecían estacionarios no había corriente inducida” (Faraday 1832a, p. 31).*

- Interacción de bobina en movimiento y campo magnético constante.

*“Cuando una espiral plana se pasaba de canto entre los polos resultaba un curioso efecto sobre el galvanómetro; la aguja primero iba intensamente en un sentido, pero entonces repentinamente se detenía como si hubiera chocado contra algún obstáculo sólido, e inmediatamente volvía [...] Esta doble acción depende de las dos mitades de la espiral (dividida por una línea que pasa por su centro perpendicularmente a la dirección de su movimiento) que actúan en sentidos opuestos y la razón por la cual la aguja se dirigió hacia el mismo lado, ya sea que la espiral pasara entre los polos en uno u otro sentido, era el hecho de que al cambiar el movimiento, también cambió*

*la dirección de los alambres en la mitad de la espiral que se aproximaba” (Faraday 1832a, p. 73).*

Cuando la espiral está entrando en el campo magnético existe una variación de la superficie creciente, sobre la cual actúa el campo magnético constante, generando entre sí una variación en el flujo magnético que provoca un campo magnético inducido que se opone al aumento del flujo creando corrientes inducidas, oscilando así el galvanómetro en un sentido. Cuando la espiral se encuentra en movimiento por el campo magnético, la superficie no varía, ya que en todo momento el total de la superficie es atravesada por un campo magnético constante, por lo que el flujo magnético también será constante, no induciendo la bobina. Cuando la espiral sale del campo magnético la oscilación que presenta el galvanómetro es en sentido contrario al que cuando entra. Esto se debe a que la variación del flujo es decreciente, ya que cada vez hay menos superficie atravesada por las líneas de campo magnético, por lo que la corriente inducida tendrá sentido contrario a si el flujo aumentara.

Además de esta serie de experimentos que dejan constancia de la inducción electromagnética, Faraday también publica en su obra de 1832 el artículo *“Sobre los fenómenos magnéticos de Arago”*.

*“Al obtener electricidad a partir de imanes por los medios ya descritos, tuve esperanza de hacer del experimento de Arago una nueva fuente de electricidad; y [...] la posibilidad de construir una nueva máquina eléctrica aprovechando la inducción magnetoeléctrica terrestre” (Faraday 1832a, p. 61).*

En el experimento se utilizó un potente imán en forma de caja del que sobresalían los dos polos, en los cuales se adhirieron dos barras de hierro dejando un pequeño espacio entre sí, donde estaría ubicado un disco de cobre que puede girar. Este disco de cobre estaría conectado a un galvanómetro por su eje y por su borde exterior. Faraday observa que cuando se hace girar el disco, el galvanómetro oscila y que lo hace en sentido contrario al cambiar el sentido del giro. Además, si aumenta la velocidad del disco el efecto sobre el galvanómetro es más pronunciado, debido a las corrientes de Foucault que se producen al variar la región del disco donde actúa magnetismo del imán. Si el sentido de giro cambia también lo hará la variación de flujo junto con las corrientes, haciendo que el galvanómetro se incline hacia el otro lado.

*“Si un alambre único se moviera como los radios de una rueda cerca de un polo magnético, estaría determinada una corriente de electricidad a través de él desde un extremo hacia el otro. Si se imagina una rueda construida con un gran número de radios y ésta gira cerca del polo en la misma forma que el disco de cobre, cada radio tendrá una corriente en él [...] Ahora que se conoce*



*la existencia de estas corrientes, los fenómenos de Arago pueden explicarse sin considerarlos debidos a la formación en el cobre de un polo de clase opuesta al aproximarlos, rodeado de una polaridad difusa [...] tampoco es esencial que la placa adquiera y pierda su estado en un tiempo finito [...] El efecto es precisamente del mismo tipo que las rotaciones electromagnéticas que tuve la fortuna de descubrir hace algunos años” (Faraday 1832a, p. 78).*

Faraday explica el fenómeno del disco de Arago con el mismo concepto que sus anteriores experimentos, las rotaciones electromagnéticas, y no la idea de Babbage y Herschel sobre que los polos del imán crean polos magnéticos contrarios en el disco de cobre. Llega a esta idea debido a que el cobre en reposo no se ve afectado por campos magnéticos y por su amplia experiencia viendo como la variación del campo magnético o de la superficie en contacto con las líneas de campo, generan una fuerza electromotriz inducida.

Tras las postulaciones teóricas basadas en las respectivas experiencias de Ampère y Faraday, ambos establecen una comunicación amistosa sobre el tema, pero no se están de acuerdo en cual es la causa. Ampère defiende que todos los fenómenos son causados por la interacción de corrientes eléctricas, creando fuerzas de acción y repulsión, mientras que para Faraday todo se reduce a las rotaciones electromagnéticas de una corriente alrededor de un imán y viceversa.

Ampère, con el fin de demostrar que su teoría era la correcta, replica el experimento de Faraday en el que hace girar un imán por la influencia de un conductor y un conductor por la influencia de un imán, pero Ampère pretende hacerlo solo con corrientes eléctricas. Para ello construye sobre una estructura de madera un recipiente metálico con dos paredes ABC y abc. Dentro de este recipiente se encuentra un circuito, por el que circulará corriente, formado por un anillo de cobre DHG que esta soldado al circuito DEFG, cuyo conjunto puede girar debido a que esta unido al alambre TT´ por medio de un recipiente de mercurio S´. El recipiente es rodeado por una bobina, sin contacto entre sí, por la que circulará una elevada corriente. El esquema del experimento y del sentido de las corrientes puede verse en la Ilustración 12.

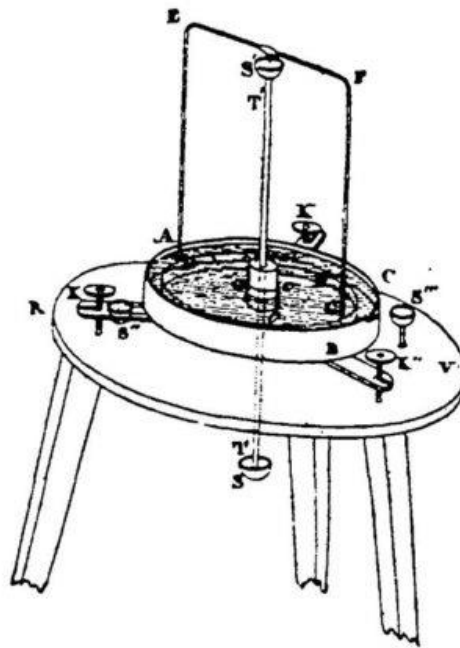


Ilustración 12: Rotación a partir de la interacción entre corrientes eléctricas (Ampère A.-M. , Memoria, 1820)

En la Ilustración 13 podemos observar el sentido de las líneas de campo magnético y sentido de corrientes del circuito TT´DEFG y las de la bobina.

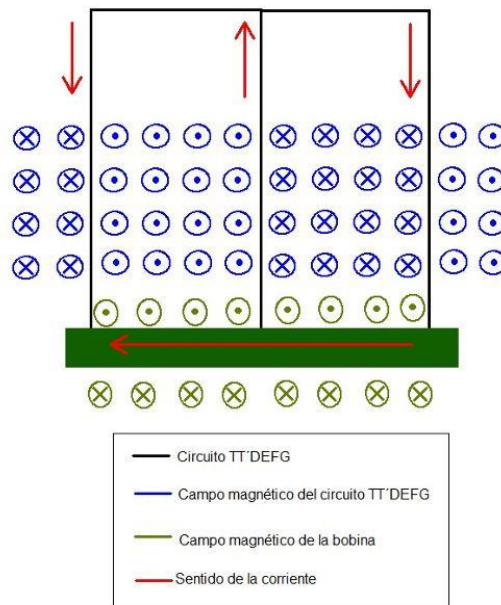


Ilustración 13: Detalle sobre el sentido de las corrientes y de las líneas de campo magnético.

Como el campo generado por la bobina y las corrientes que desciende por ellas hacia las barras ED y FG son perpendiculares, la fuerza resultante será también perpendicular a ambas, lo que produce un par de fuerzas de sentidos opuestos

en ED y en FG, generando el giro. En la Ilustración 14 se puede entender mejor el sentido del par de fuerzas.

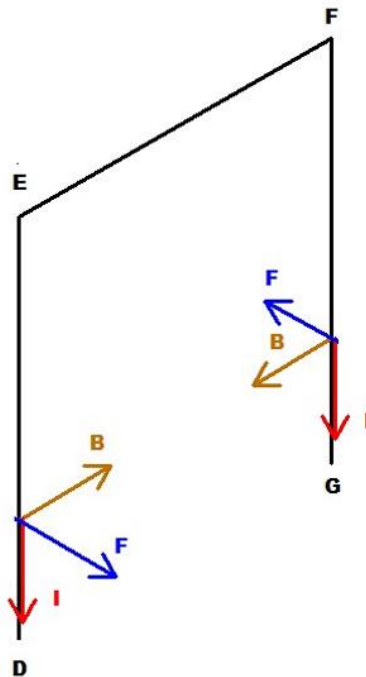


Ilustración 14: Par de fuerzas resultantes de la interacción de las respectivas corrientes por los hilos y el campo magnético de la bobina.

$$\vec{F}_m = I \cdot (\vec{L} \times \vec{B})$$

$\vec{F}_m$ : Fuerza magnética [N]

I: Intensidad del conductor [A]

L: Longitud del hilo conductor [m]

B: Campo magnético [T]

Esta rotación sin presencia de imanes fortalece la creencia de Ampère de que la corriente es el hecho primitivo causante de las fuerzas de atracción y repulsión, pero Faraday no termina de estar convencido y prefiere esperar a nuevas pruebas antes de tomar una decisión sobre la teoría (Blondel & Wolff, Faraday, Ampère, et le mystère des rotations continues, 2011).

Con esta reafirmación sobre su teoría, Ampère pretende demostrar la existencia de corrientes en los imanes, excluyendo la idea de fluido magnético. Para explicar el comportamiento de los elementos que sufrían inducción magnética, decía que las corrientes moleculares no estaban orientadas correctamente pero que cuando se encontraba formando parte de un solenoide, la corriente del conductor bobinado orientaba dichas corrientes. Su ley se basa en la experiencia de elementos finitos de corriente mientras que

matemáticamente se basa en elementos infinitesimales corriente, pero es aceptada debido al pensamiento clásico Newtoniano, que tiene una fuerte influencia en el mundo y en Ampère.

Por otro lado, Faraday se aferra a la interacción entre imanes y conductores por medio de la inducción magnetoeléctrica, y propone dos nuevos conceptos: líneas de fuerza y el estado electrónico. Un mes después de anunciar el descubrimiento de la inducción magnetoeléctrica, Faraday expone sobre “La fuerza y la dirección de la inducción magnetoeléctrica general”:

*“Cuando una corriente eléctrica atraviesa un alambre, ese alambre está rodeado por todas partes de curvas magnéticas, que disminuyen en intensidad de acuerdo con su distancia del alambre, las cuales pueden asimilarse a anillos situados en planos perpendiculares al alambre o quizás a la corriente dentro de él. Estas curvas, aunque diferentes en forma, son perfectamente análogas a las que existen entre dos polos magnéticos contrarios...”* (Faraday 1932b, p. 89)

Al otro lado del Atlántico, Joseph Henry<sup>11</sup>, en 1831, realizaba experimentos con bobinas de alambre y observó que si variaba la corriente en una bobina se generaba un campo magnético variable que, a su vez, induce una fuerza electromotriz en la misma bobina (Reingold, 1972). Este efecto sería conocido como autoinducción y se produce debido a que un campo magnético variable creado por una corriente, induce un voltaje en la propia bobina. De acuerdo con la Ley de Faraday de la inducción electromagnética, la autoinducción tiende a oponerse a los cambios en la corriente en el circuito, es decir, si la corriente de la bobina aumenta la corriente inducida irá en sentido contrario, si la corriente de la bobina disminuye la corriente inducida irá en el mismo sentido, lo que significa que actúa como una forma de resistencia al cambio.

También en la Serie I de las “Experimental Researches in Electricity”, Faraday desarrolló la idea de las líneas de campo magnético como una forma visual de representar el campo magnético alrededor de un imán o una corriente eléctrica. Estas líneas imaginarias muestran la dirección y la intensidad del campo magnético en diferentes puntos del espacio. La conceptualización de las líneas de campo magnético permitió a Faraday comprender mejor cómo se comportan los imanes y las corrientes eléctricas, y fue fundamental para su formulación de la ley de inducción electromagnética, que establece que un cambio en el flujo magnético a través de una superficie induce una corriente

---

<sup>11</sup> **Joseph Henry** (1797-1878) fue un físico e inventor estadounidense conocido por contribuir a las bases del electromagnetismo moderno.

eléctrica en un circuito cercano. Aunque Faraday desarrolló la idea de las líneas de campo magnético en la década de 1830, su trabajo influyó en el desarrollo posterior de la teoría electromagnética por parte de otros científicos, incluido James Clerk Maxwell.

*“por curvas magnéticas yo entiendo las líneas de fuerza magnéticas, modificadas sin embargo por la yuxtaposición de los polos, que podrían ser representadas por limaduras de hierro, o aquellas a las que sería tangente una muy pequeña aguja magnética”* (Faraday 1832a, p. 75).

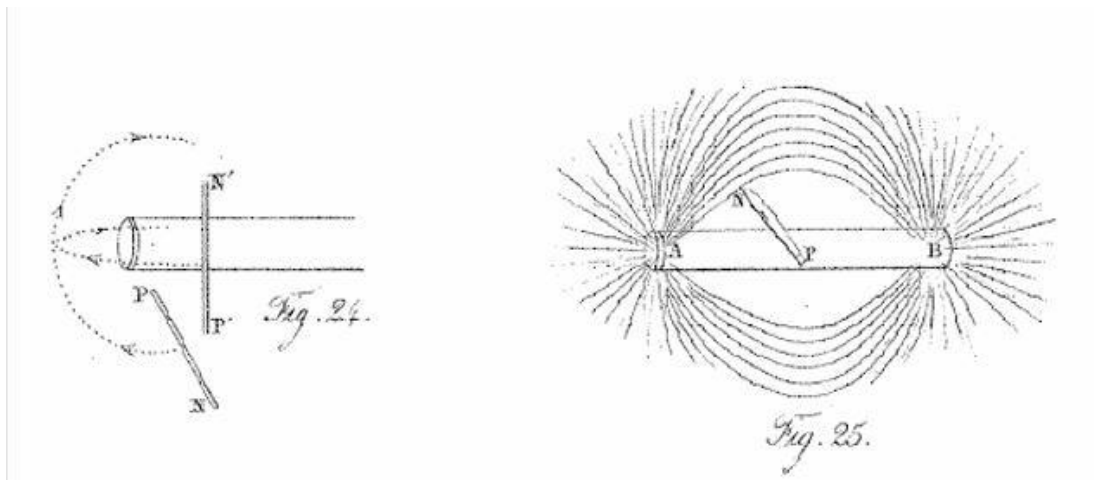


Ilustración 15: Líneas de campo de un conductor (Faraday 1832 Fig. 24) y de un imán (Faraday 1832 Fig. 25)

## Weber y Gauss y como afecta la velocidad relativa de las cargas

Analizaremos el desarrollo que llevó a la formulación de la Ley de Lorentz apoyándonos en la siguiente bibliografía:

- "*Intensitas vis magneticae terrestris ad mensuram absolutam revocata*" por Carl Friedrich Gauss (1832)
- "*Resultate aus den Beobachtungen des Magnetischen Vereins*" por Carl Friedrich Gauss y Wilhelm Weber (1837-1843).
- "Campos electromagnéticos" (2001) por Roald K. Wangsness

Weber<sup>12</sup> inicia su investigación en electromagnetismo en 1830 acompañado en sus seis primeros años por Gauss<sup>13</sup>. Gauss expuso su artículo "*Intensitas vis magneticae terrestris ad mensuram absolutam revocata*" la introducción de las unidades de medida del magnetismo. Ambos observaron que cuando una corriente eléctrica fluía a través de un conductor, se generaba un campo magnético a su alrededor. Sin embargo, lo que distinguió sus investigaciones de resto fue su aportación de que este campo magnético estaba intrínsecamente relacionado con la velocidad relativa entre las cargas eléctricas que componen la corriente, que presentaron en los volúmenes "*Resultate aus den Beobachtungen des Magnetischen Vereins*". Para ello, diseñó un dispositivo llamado "anillo de Weber". Este dispositivo consistía en un anillo metálico con dos segmentos aislados eléctricamente. A través de estos segmentos, Weber hacía circular corrientes eléctricas en direcciones opuestas. Al variar la velocidad relativa de las corrientes en los segmentos del anillo, Weber pudo observar cómo esto afectaba la fuerza magnética entre ellos y, por lo tanto, la intensidad del campo magnético generado alrededor del anillo. Esto le permitió demostrar experimentalmente que la fuerza magnética entre las corrientes eléctricas era proporcional a la velocidad relativa entre ellas, es decir, cuanto mayor es la velocidad relativa entre estas cargas, más fuerte es el campo magnético generado. Este experimento fue fundamental porque estableció una relación cuantitativa entre la velocidad relativa de las cargas eléctricas y la fuerza magnética que experimentan, lo que contribuyó significativamente al desarrollo de la teoría electromagnética. Sentó las bases para la posterior formulación de la Ley de Lorentz a finales del siglo XIX (Gauss & Weber, 1838-1843).

---

<sup>12</sup> **Wilhelm Eduard Weber** (1804-1891) fue un físico alemán conocido por sus contribuciones a la teoría electromagnética.

<sup>13</sup> **Carl Friedrich Gauss** (1777-1855), fue un matemático alemán del siglo XIX conocido por sus avances en matemática aplicadas.

## La fuerza de Grassmann y de Ampère, y la fuerza longitudinal

Para comparar los planteamientos matemáticos de Grassmann y Ampère nos apoyaremos en la siguiente bibliografía:

- “La force d’Ampère, une formule obsolète?” por Christine Blondel y Bertrand Wolff (2009b).
- “Cálculo de Indutância e de Força em Circuitos Elétricos” por Marcelo Bueno y Andre Koch Torres Assis (2015).

La fuerza de Ampère se expresa como una interacción directa entre corrientes y depende de la orientación relativa y la magnitud de estas corrientes, así como de la distancia que las separa, y donde la fuerza se transmite instantáneamente entre los elementos de corriente (Blondel & Wolff, ¿La force d’Ampère, une formule obsolète?, 2009b).

Fuerza de Ampère:

$$d^2\vec{F} = \frac{\mu_0 \cdot I_i \cdot I_j}{4\pi} \cdot \frac{\hat{r}_{ij}}{r_{ij}^2} [3(d\vec{r}_i \cdot \hat{r}_{ij})(d\vec{r}_j \cdot \hat{r}_{ij}) - 2(d\vec{r}_i \cdot d\vec{r}_j)]$$

Grassmann<sup>14</sup> no desmontó directamente el planteamiento de Ampère. Sin embargo, en 1845, Grassmann desarrolló un formalismo matemático que permitía describir fenómenos físicos, incluidos los electromagnéticos, de una manera más rigurosa y general que las técnicas utilizadas por Ampère.

Fuerza de Grassmann:

$$\begin{aligned} d^2\vec{F} &= I_i \cdot d\vec{r}_i \times d\vec{B}_j(\vec{r}_i) = I_i \cdot d\vec{r}_i \times \left( \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I_j d\vec{r}_j \times \hat{r}_{ij}}{r_{ij}^2} \right) \\ &= \frac{\mu_0 \cdot I_i \cdot I_j}{4\pi} \cdot \frac{1}{r_{ij}^2} [(d\vec{r}_i \cdot \hat{r}_{ij})d\vec{r}_j - (d\vec{r}_i \cdot d\vec{r}_j)\hat{r}_{ij}] \end{aligned}$$

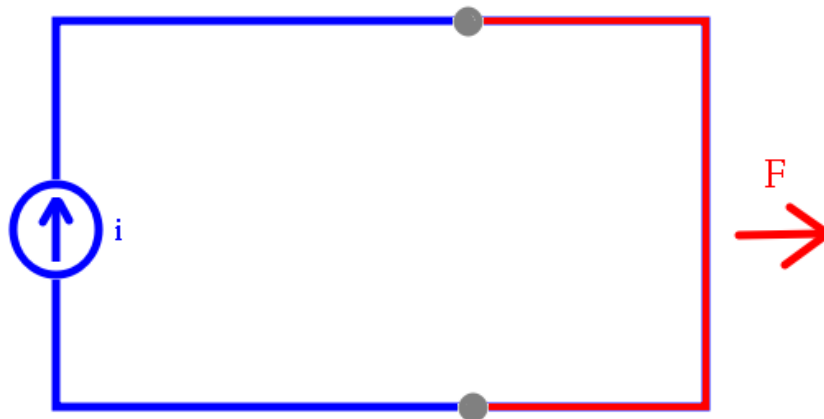
La fuerza de Grassmann se basa en la idea de que un elemento de corriente genera un campo magnético, y este campo interactúa con otro elemento de corriente para producir una fuerza. Esta interpretación se alinea más con la teoría de los campos y las ecuaciones de Maxwell, donde las fuerzas electromagnéticas se describen en términos de campos eléctricos y magnéticos, es decir, donde la interacción entre corrientes se mediatiza por campos electromagnéticos que ocupan el espacio.

---

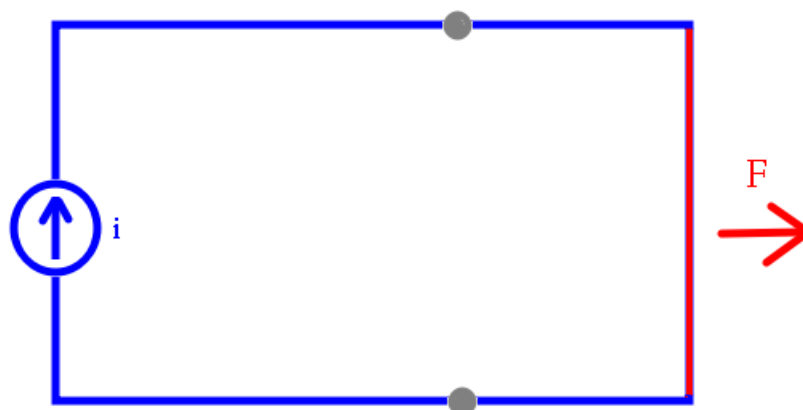
<sup>14</sup> **Hermann Grassmann** (1809-1877) fue un matemático alemán conocido por sentar las bases para el cálculo vectorial moderno y la teoría de formas diferenciales.

Para circuitos cerrados, se obtienen los mismos resultados con Ampère y con Grassmann, pero con Grassmann hay que considerar como el circuito hace fuerza sobre sí mismo, ya que describe como un campo magnético interactúa con una corriente eléctrica y cómo esta corriente genera y es afectada por los campos. La fuerza que ejerce el circuito sobre sí mismo se debe a que la fuerza de Grassmann no satisface el principio de acción-reacción. El problema con Grassmann es que no satisface este principio para la interacción entre elementos de corriente, pero si lo hace entre circuitos y entre circuito y elemento de corriente.

En las siguientes imágenes, podemos ver la diferencia de la parte del circuito para tener en cuenta a la hora de realizar el cálculo, siendo esta de color azul. Podemos ver un circuito eléctrico que cuenta con una parte móvil gracias a unas vasijas de mercurio, permitiendo ver la fuerza que ejerce por el desplazamiento que sufre la parte móvil.



*Ilustración 16: Circuito para el cálculo de Ampère*



*Ilustración 17: Circuito para el cálculo de Grassmann.*



Una extensión al trabajo de Ampère fue postulada por Weber en 1846, en su artículo "Electrodynamische Maassbestimmungen über ein allgemeines Grundgesetz der elektrischen Wirkung", proponiendo una fórmula para la fuerza entre dos cargas en movimiento que incluye términos dependientes de la velocidad y la aceleración de las cargas. La teoría de Weber, su enfoque y sus ideas influyeron significativamente en el desarrollo posterior de la teoría electromagnética, ya que en su teoría la fuerza resultante no solo depende de la separación y la velocidad relativa, sino también de su aceleración relativa, lo que implica una componente de fuerza longitudinal. Aunque las contribuciones de Weber no llevaron directamente al desarrollo de la teoría de la relatividad especial, su trabajo sentó las bases conceptuales para la incorporación de la velocidad de la luz como una constante fundamental y para el abordaje de los fenómenos relativistas. (Weber, 1846)

Graneau<sup>15</sup> llevó a cabo "explosiones de cables" en 1983 postulando una fuerza longitudinal, para ello colocó un alambre de 1m de largo y 1mm de diámetro entre los polos de un banco de condensadores dejando un espacio entre los extremos del alambre y los polos. Cuando el banco de condensadores se descarga es capaz de romper el dieléctrico del aire, generando arcos eléctricos entre el alambre y el banco, cerrando el circuito, por el que pasarán 7000 A. El análisis microscópico nos indica que el calor no es la causa de la rotura y que la rotura se produce por una fuerza de tracción que es proporcional al cuadrado de la corriente. La primera fractura se produce en la mitad del alambre, siendo la siguiente fractura también en las mitades de los primeros restos, y así sucesivamente, hasta que los pedazos alcanzan la misma longitud que el diámetro del alambre. Graneau pudo explicarlo con la fuerza de Ampère, pero no con la de Grassmann. El problema con la fuerza de Grassmann es que es imposible obtener una fuerza paralela a la dirección del elemento de corriente, es decir, una fuerza longitudinal, ya que es un producto vectorial entre él y el campo magnético, por lo que resulta imposible describir esta fuerza de tracción (Bueno & Torres Assis, 2015).

La fuerza de Ampère fue una de las primeras formulaciones aceptadas para describir la interacción entre corrientes y fue utilizada ampliamente en los primeros estudios de electromagnetismo. Aunque la fuerza de Grassmann no fue tan reconocida y no buscaba refutar directamente las leyes de Ampère, su trabajo proporcionó una base matemática más sólida para la teoría de campos. (Blondel & Wolff, ¿La force d'Ampère, une formule obsolète?, 2009b).

---

<sup>15</sup> **Peter Graneau** (1921-2014) fue un físico e ingeniero polaco que investigó la electrodinámica amperiana, proponiendo soluciones alternativas a las teorías de Maxwell-Lorentz-Einstein.

## Maxwell uniendo matemáticamente electricidad y magnetismo

Se utilizará la siguiente bibliografía para explicar los experimentos, resultados y conclusiones de Maxwell:

- "Electrodynamische Maassbestimmungen über ein allgemeines Grundgesetz der elektrischen Wirkung" (1846) por Wilhelm Weber.
- "A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field" (1864) y "A Treatise on Electricity and Magnetism. Vol II" (1873) por James Clerk Maxwell
- "J. C. Maxwell: Materia y movimiento." (2006) por J. M. Sánchez Ron.
- "Maxwell's Equations" (2013) por G. Turnbull.
- "Maxwell's Influence on the Development of the Conception of Physical Reality" (1931) por Albert Einstein.
- "Sur les hypothèses relatives à l'éther lumineux." (1850) por A. Fizeau
- "A Treatise on the Analytical Dynamics of Particles and Rigid Bodies" (1904 y 1917) por Edmund Taylor Whittaker.
- "Campos electromagnéticos" (2001) por Roald K. Wangsness.
- "On Electromagnetic Effects Produced by Electrical Disturbances in Insulators" (1888) por Heinrich Hertz.

Maxwell<sup>16</sup> queriendo sintetizar los conocimientos en un tratado de electricidad y magnetismo, se decantaría al final por la matemática de Ampère, ya que si satisface el principio de acción-reacción.

*"muchas veces se lo usa para probar que dos elementos de una corriente en la misma línea recta se repelen entre sí, y, por lo tanto, para mostrar que la fórmula de Ampère, que da como resultado una repulsión de elementos colineales, es más correcta que la de Grassmann, que no da ninguna acción entre dos elementos en la misma línea recta. Pero es evidente que, dado que las fórmulas tanto de Ampère como la de Grassmann dan los mismos resultados para circuitos cerrados, y puesto que tenemos en el experimento sólo un circuito cerrado, ningún resultado de este experimento puede favorecer a uno más que a la otra de estas teorías" (cf. Maxwell 1873, Vol 2, p. 290).*

Basándose en los estudios anteriores, sobre todo de Faraday, Maxwell desarrolló el concepto de campo matemático, que es la magnitud de una propiedad física que puede tomar un valor en espacio en ausencia de cuerpos,

---

<sup>16</sup> **James Clerk Maxwell** (1831-1879) fue un eminente físico y matemático escocés, conocido por formular las ecuaciones de Maxwell que unifican los fenómenos eléctricos y magnéticos.

y líneas de fuerza, que son líneas imaginarias que se dibujan en un campo para representar la dirección y la intensidad de la fuerza en cada punto del espacio. Basándose en estos conceptos publicó las ecuaciones fundamentales del electromagnetismo en su artículo titulado "A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field", que fue presentado en la Royal Society de Londres el 8 de diciembre de 1864 y publicado en los "Proceedings of the Royal Society" en 1865 (Sánchez Ron, 2006).

Las 20 ecuaciones que Maxwell publicó en 1865 fueron sintetizadas por Oliver Heaviside<sup>17</sup> y analizadas vectorialmente por Gibbs<sup>18</sup>, en 1884, perdiendo información de las originales de Maxwell. Después de forma independiente por Heinrich Hertz<sup>19</sup>, utilizando la notación vectorial (Turnbull, 2013). Siendo las hoy conocidas como ecuaciones de Maxwell las siguientes:

- Ley de Gauss para el campo eléctrico: Describe cómo el flujo eléctrico a través de una superficie cerrada está relacionado con la carga eléctrica en el interior de la superficie. El flujo del campo es producido por las cargas, las cuales presentan líneas de fuerza abiertas, permitiendo que existan cargas individuales con uno u otro signo. Es decir, el flujo de campo eléctrico a través de una superficie es proporcional a la carga neta encerrada en la superficie.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$\vec{\nabla} \cdot \vec{E}$ : Divergencia del campo eléctrico

$\vec{E}$ : Campo eléctrico [ $N/C$  ó  $V/m$ ]

$\rho$ : Densidad de carga eléctrica [ $C/m^3$ ]

$\epsilon_0$ : Permitividad del vacío [ $F/m$ ]

- Ley de Gauss para el campo magnético: Esta ecuación establece que el flujo magnético a través de una superficie cerrada es siempre cero, lo que implica que no existen monopolos magnéticos. Para el campo magnético no hay origen y las líneas de fuerza son cerradas, lo que provoca que haya las mismas líneas de fuerza que entran en la superficie y las que salen de ella.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

---

<sup>17</sup> **Oliver Heaviside** (1850-1925) fue un físico y matemático británico conocido el cálculo operacional y formular las ecuaciones de Maxwell en su forma vectorial

<sup>18</sup> **Josiah Willard Gibbs** (1839-1903) fue un físico y químico estadounidense conocido por sus fundamentales contribuciones a la termodinámica y por el desarrollo del análisis vectorial.

<sup>19</sup> **Heinrich Hertz** (1857-1894) fue un físico alemán conocido por sus experimentos que confirmaron la existencia de ondas electromagnéticas.

$\vec{\nabla} \cdot \vec{B}$ : Divergencia del campo magnético  
 $\vec{B}$ : Campo magnético [T ó Wb/m<sup>2</sup>]

- Ley de Faraday: Esta ecuación describe cómo un campo magnético variable en el tiempo induce un campo eléctrico rotacional ( $\vec{\nabla} \times$ ).

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$\vec{\nabla} \times \vec{E}$ : Rotacional del campo eléctrico

$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ : Variación temporal del campo magnético [T/s]

- Ley de Ampère-Maxwell: Esta ecuación relaciona la creación de un campo magnético rotacional con la densidad de corriente eléctrica y la variación temporal del campo eléctrico. De esta formulación la introducción de la ley es de Ampère, y Maxwell añadió el término adicional de la variación temporal del campo eléctrico.

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{J} + \mu_0 \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

$\vec{\nabla} \times \vec{B}$ : Rotacional del campo magnético [ $\frac{T \cdot m^2}{A}$  ó  $\frac{Wb}{A}$ ]

$\mu_0$ : Permeabilidad del vacío [ $4\pi \times 10^{-7}$  H/m]

$\epsilon_0$ : Permitividad del vacío [ $8.854 \times 10^{-12}$  F/m]

$\vec{J}$ : Densidad de corriente [A/m<sup>2</sup>]

$\frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$ : Variación temporal del campo eléctrico [ $\frac{V}{m \cdot s}$ ]

Maxwell también se percató de lo mucho que se parecían las leyes de Faraday y de Ampère-Maxwell con la ecuación de onda. Aquí podemos apreciar su similitud:

**Ley de Faraday**

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

**Ecuación de onda**

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu_0 \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t^2}$$

**Ley de Ampère-Maxwell**

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{J} + \mu_0 \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

**Ecuación de onda**

$$\nabla^2 \vec{B} = \mu_0 \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{\partial \vec{B}}{\partial t^2}$$

Al suponer el comportamiento de onda, se dispuso a resolver a qué velocidad debía moverse, para ello necesitaría saber el valor de la permitividad y permeabilidad del vacío, datos ya conocidos (Maxwell, A Treatise on Electricity and Magnetism, 1873).

$$c_{\text{Maxwell}} = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \cdot \epsilon_0}} = \frac{1}{\sqrt{4\pi * 10^{-7} * 8.854 * 10^{-12}}} = 310.740 \text{ km/s}$$

Cabe decir que la velocidad de la luz había sido estimada por Fizeau<sup>20</sup> en 1849, utilizando un aparato que constaba de una rueda dentada giratoria y un sistema de espejos. El experimento consistía en pasar la luz a través de los dientes de la rueda hacia un espejo a kilómetros de distancia, la luz se reflejaba hacia la rueda dentada, Fizeau ajustaba la velocidad de la rueda hasta que la luz reflejada era bloqueada por un diente de la rueda, entonces utilizaba la velocidad de rotación de la rueda y la distancia al espejo para calcular la velocidad de la luz, teniendo un resultado aproximado al real. También realizó mediciones en otros medios como el agua, observando una menor velocidad que en el aire, la cual es muy aproximada a la velocidad en el vacío, apoyando la teoría ondulatoria de la luz, que predecía que la velocidad de la luz disminuiría en un medio más denso como el agua. (Fizeau, 1850).

$$c_{\text{Fizeau}} = 313.000 \text{ km/s} \quad c_{\text{Real}} = 299.792 \text{ km/s}$$

*“difícilmente podemos evitar la inferencia de que la luz no es otra cosa que ondulaciones transversales del mismo medio que es la causa de los fenómenos eléctricos y magnéticos”* (Maxwell, A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field, 1865).

Podemos observar la aproximación los resultados de Maxwell y Fizeau, lo que llevó a Maxwell suponer que la luz tiene un comportamiento de onda y un carácter electromagnético. La presentación de estas ecuaciones y lo que significa la teoría de campos causará una auténtica revolución, ya que estaba establecida la física clásica basada en las leyes de Newton que permite describir el mundo macroscópico con principio deterministas, mientras que la física moderna se centra en fenómenos a escalas más pequeñas y utiliza modelos probabilísticos y no deterministas para explicar el comportamiento de partículas subatómicas.

Bajo este contexto, Hertz inicia una serie de experimentos entre 1886 y 1889, publicando sus resultados sobre la detección de ondas electromagnéticas y la confirmación experimental de la teoría de Maxwell en el artículo "On Electromagnetic Effects Produced by Electrical Disturbances in Insulators". La configuración del experimento viene dada por dos alambres conectados a un polo de la pila, respectivamente, donde en un extremo de los alambres hay una esfera de cobre, que se irá acumulando carga como un condensador, y el otro extremo estará encarado al otro alambre, dejando un pequeño espacio entre ellos. En la separación se producirá una chispa cuando se descarguen las bolas

---

<sup>20</sup> **Hippolyte Fizeau** (1819-1896) fue un físico francés conocido por ser capaz de medir la velocidad de la luz.

de cobre, lo que genera una onda electromagnética que viaja hasta otra espira alejada, la cual no está completamente cerrada, provocando una chispa entre sus extremos. Todo ello da fuerza a la teoría de onda electromagnética de Maxwell, y como estas podían inducir corrientes (Hertz, 1888).

Maxwell conecta matemáticamente los campos eléctricos y magnéticos. Casi medio siglo después, Whittaker<sup>21</sup> publicó "A Treatise on the Analytical Dynamics of Particles and Rigid Bodies" en dos volúmenes, 1904 y 1917, donde incluía la teoría de potenciales, la teoría de funciones especiales, la teoría de la gravitación, entre otros. Destacaremos la teoría de potenciales, la cual describe los campos electromagnéticos en ausencia de cargas o corrientes, es decir, en el vacío. Esta teoría proporciona una manera de expresar los campos eléctrico y magnético en términos de funciones potenciales, lo que simplifica en gran medida el análisis de los campos electromagnéticos y permite resolver problemas complejos de manera más eficiente. En lugar de trabajar directamente con los campos eléctrico y magnético, la teoría de potencial utiliza dos funciones potenciales: el potencial magnético y el potencial eléctrico. Gracias a esta reformulación, se puede describir a las dos fuerzas, perpendicular y longitudinal, que sufre un conductor cargado en presencia de otro, como una fuerza diagonal. Esta fuerza diagonal será igual en magnitud y dirección para el otro conductor, pero tendrá un sentido contrario, cumpliendo el principio de acción-reacción (Whittaker, 1917).

- El potencial magnético puede expresarse como el rotacional de potencia vectorial y tiene cierta libertad en su elección, similar a la libertad de elegir el potencial escalar.

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$$

$$B : \text{Potencial magnético} \left[ T \cdot m \text{ ó } \frac{Wb}{m} \right]$$

A: Potencial vectorial

- El potencial eléctrico puede expresarse como el negativo del gradiente del potencial escalar, donde el segundo término es el campo eléctrico inducido por cambios temporales en el potencial vectorial.

$$\mathbf{E} = -\nabla\phi - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}$$

$$E : \text{Potencial eléctrico} \left[ V \text{ ó } \frac{J}{c} \right]$$

$\phi$ : Potencial escalar

$\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}$ : Variación temporal del potencial vectorial

---

<sup>21</sup> **Edmund Taylor Whittaker** (1873-1956) fue un matemático británico conocido por sus contribuciones a la teoría de funciones especiales y la teoría de potenciales electromagnéticos.

También añadió algunas ecuaciones de Maxwell en el espacio libre, siendo cero la carga ( $\rho=0$ ) y la corriente ( $J=0$ ) por la ausencia de estas, simplificando las ecuaciones de Maxwell para la teoría de potenciales.

- La primera ley indica que el flujo eléctrico a través de cualquier superficie cerrada es nulo en ausencia de cargas eléctricas.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0$$

- La segunda indica que no hay fuentes magnéticas en el espacio libre.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

- La ley de Faraday-Lenz describe cómo los campos magnéticos variables en el tiempo inducen campos eléctricos en rotación.

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

- La ley de Ampère por Whittaker indica que los campos eléctricos variables en el tiempo inducen campos magnéticos.

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

Aplicando las condiciones de vacío, es decir, sin presencia de cargas ni corrientes, las leyes de Faraday Ampère-Maxwell son aún más similares a la ecuación de onda. Reafirmando la condición de onda del electromagnetismo.

**Ley de Faraday**

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

**Ecuación de onda**

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu_0 \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t^2}$$

**Ley de Ampère-Maxwell**

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

**Ecuación de onda**

$$\nabla^2 \vec{B} = \mu_0 \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{\partial \vec{B}}{\partial t^2}$$

- La ecuación de Poisson para el potencial escalar lo relaciona directamente con su densidad de carga y permitividad del vacío:

$$\nabla^2 \phi = -\frac{\rho}{\epsilon_0}$$

- La ecuación de onda para el potencial vectorial se relaciona con la velocidad de la luz, la variación temporal del potencial vectorial y la densidad de corriente en el vacío:

$$\nabla^2 A - \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} = -\mu_0 \cdot J$$



## La relatividad especial atribuida a Einstein

Se utilizará la siguiente bibliografía para explicar los experimentos, resultados y conclusiones sobre relatividad especial.

- “On the Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether” (1887) por Michelson y Morley.
- "The Ether and the Earth's Atmosphere" (1889) por George Francis FitzGerald.
- "Electromagnetic Phenomena in a System Moving with any Velocity Less than that of Light" (1885) por Hendrick Lorentz.
- “Relatividad especial” (2005) por Augusto Holguin
- "La mesure du temps" en (1898) y "Sur la dynamique de l'électron" en (1905) por Henri Poincaré.
- “Zur Elektrodynamik bewegter Körper” (1905) y “Maxwell's Influence on the Development of the Conception of Physical Reality” (1931) por Albert Einstein.
- “Raum und Zeit” (1908) por Hermann Minkowski.
- “Física universitaria” (2021) por William Moebis, Samuel J. Ling y Jeff Sanny.
- “Electricity and Magnetism: An Introduction to the Theory of Electric and Magnetic Fields” (1966) por Jefimenko.

Después de la publicación de Maxwell, donde une electricidad y magnetismo bajo el concepto de teoría de campos, y sumada a su postulación de que la luz tiene un comportamiento similar a la de una onda electromagnética. Los fenómenos relacionados con la propagación de la luz, como la reflexión, la refracción y la dispersión se podían explicar mediante el modelo de onda de la luz. En aquella época existía la hipótesis de que la tierra y la luz se movían a través de un medio llamado éter lumífero (Andalucía, Experimento de Michelson y Morley, s.f.).

Bajo estas premisas, Michelson<sup>22</sup> y Morley<sup>23</sup> llevaron a cabo un experimento publicado en 1887, titulado “On the Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether”. El experimento de Michelson-Morley fue diseñado para detectar la existencia del éter. Como, teóricamente, la tierra se desplazaba a

---

<sup>22</sup> **Albert A. Michelson** (1852-1931): Físico estadounidense Premio Nobel de Física en 1907, por la medición precisa de la velocidad de la luz.

<sup>23</sup> **Edward W. Morley** (1838-1923): Químico y físico estadounidense, conocido por su colaboración con Michelson en el experimento de Michelson-Morley.

través del éter, creyeron que existirían corrientes de éter que afectarían a la luz, modificando su velocidad dependiendo de si las corrientes estaban a favor o en contra de su trayectoria. Para ello utilizaron el interferómetro, el cual divide un haz de luz en dos, por medio de un espejo semitransparente, tomando direcciones perpendiculares entre sí. Los haces se reflejan en un espejo volviendo al espejo semitransparente, el cual, ahora, los combinará en un único haz, dándoles el mismo sentido, haciendo que choquen con una pantalla que permite ver el patrón de onda (Michelson & Morley, 1887). Podemos ver la configuración en la Ilustración 18.

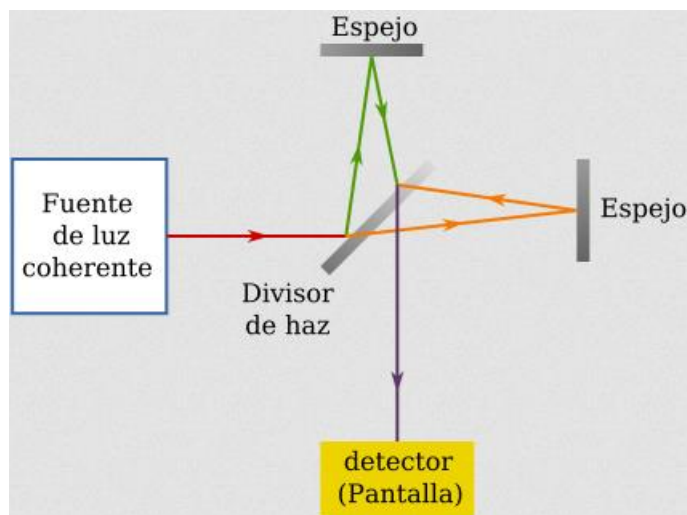


Ilustración 18: Experimento Michelson-Morley ([https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Michelson-Morley\\_experiment\\_\(es\).svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Michelson-Morley_experiment_(es).svg))

Esta configuración pretende que los dos haces de luz atraviesen el éter en direcciones perpendiculares, viéndose afectada la velocidad relativa entre ambas por el éter y, por tanto, las frecuencias de estas se verán desfasadas entre sí, afectando los patrones de onda resultantes, pero no fue así, ya que los patrones de luz eran completamente iguales, aun cambiando la orientación del experimento (Michelson & Morley, 1887).

En el experimento se buscaba una interferencia de onda negativa, haciendo que las frecuencias de los respectivos haces estuvieran desfasadas entre sí, por la actuación del éter, el cual supuestamente variaría la velocidad de alguno o de ambos haces de luz. Esto se reflejaría en el detector por mostrar un patrón distinto y atenuación de la luz. Si las ondas no sufren ningún desfase entre sí, el patrón de onda sería igual y no habría atenuación, que fue lo que observaron Michelson y Morley, y desmontó la teoría del éter. Los tipos de interferencia entre dos ondas son: positiva cuando sus amplitudes se suman al estar sus frecuencias en fase y negativa cuando sus amplitudes se contrarrestan al estar sus frecuencias desfasadas entre sí.

Este resultado hizo perder fuerza a la teoría del éter, y surgieron multitud de cuestiones por los resultados del experimento de Michelson-Morley. En 1889,

En 1889 FitzGerald<sup>24</sup>, quien creía en la existencia del éter, publicó en su artículo "The Ether and the Earth's Atmosphere" que los objetos en movimiento a través del éter experimentaban una contracción en la dirección del movimiento. Según FitzGerald, si la Tierra se mueve a través del éter, los objetos que componen el interferómetro también, contrayéndose en la dirección del movimiento. Esta contracción sería en la misma proporción que la diferencia en la velocidad de la luz debido al movimiento de la Tierra a través del éter. Por lo tanto, cualquier diferencia en el tiempo de viaje de la luz causada por el movimiento de la Tierra se compensaría con la contracción de los brazos del interferómetro, lo que resultaría en un resultado nulo en el experimento (FitzGerald, 1889).

Fitzgerald, bajo premisas teóricas, proporcionó una gran idea con la contracción de la longitud debido a que la velocidad de la luz es una constante, y para que se cumpla dicha constante en todo momento, es el espacio el que se contrae respecto al observador en movimiento o el objeto en movimiento respecto de un observador en reposo. Un ejemplo visual sería el de un tren en movimiento que tiene una partícula de luz que se mueve en la vertical, subiendo y bajando. Para un observador que se encuentre en el tren la partícula realizará un movimiento vertical mientras que para un observador fuera del tren la partícula irá describiendo una serie de crestas y valles en dirección al movimiento del tren. Visualmente parece que la partícula recorre mayor distancia si el observador está en el suelo, pero la velocidad de la partícula siempre es la misma para ambos observadores por lo que es el espacio el que se contrae en dirección al movimiento del tren (Holguin, 2005). Podemos ver el ejemplo del movimiento relativo en la Ilustración 19.



Ilustración 19. (cf. Holguin 2005. Fig.4)

<sup>24</sup> **George Francis FitzGerald** (1851-1901) fue un físico irlandés conocido por sus contribuciones a la teoría electromagnética y a la teoría de la relatividad.

Tras esta publicación, Lorentz<sup>25</sup>, quien también defendía la existencia del éter, se embarcó en la idea de describir en lenguaje matemático la teoría de Fitzgerald. Es en 1895 que publica su artículo titulado "Electromagnetic Phenomena in a System Moving with any Velocity Less than that of Light" donde a partir de la contracción de Fitzgerald desarrolla las transformaciones de Lorentz, para explicar cómo las ecuaciones de Maxwell se transforman entre diferentes sistemas de referencia en movimiento relativo, el problema es que no daba respuesta para todos los sistemas inerciales. También proporcionó una formulación más detallada de las fuerzas electromagnéticas, consolidando la expresión de la fuerza de Lorentz en la forma familiar que conocemos hoy:

### Ley de Lorentz

$$\vec{F} = q \cdot (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

F: Fuerza experimentada por la partícula [N]

q: Carga de la partícula [C]

E: Campo eléctrico en la partícula [V/m]

v: Velocidad relativa entre cargas [m/s]

B: Campo magnético en la partícula [T]

Si suponemos que no hay campo eléctrico y que un conjunto de cargas en movimiento tiene el mismo sentido, podemos entender este conjunto como una corriente eléctrica a través de un conductor siendo su resolución matemática la siguiente para un conductor recto:

$$\vec{F}_m = I \cdot (\vec{L} \times \vec{B})$$

$\vec{F}_m$ : Fuerza magnética [N]

I: Intensidad del conductor [A]

L: Longitud del hilo conductor [m]

B: Campo magnético [T]

La fuerza resultante sería perpendicular al campo magnético y a la corriente que circula por el conductor, cumpliendo con las observaciones de los experimentos que hacía interaccionar un conductor recto cargado con un campo magnético, pero no puede dar explicación a la fuerza longitudinal.

---

<sup>25</sup> **Hendrik Lorentz** (1853-1928) fue un físico neerlandés cuyas contribuciones en electromagnetismo y la teoría de la relatividad especial lo llevaron a ganar el Premio Nobel de Física en 1902.

Tras ello, Poincaré<sup>26</sup> publica "La mesure du temps" en 1898 y "Sur la dynamique de l'électron" en 1905, donde defendía la existencia del éter como medio necesario para la propagación de ondas electromagnéticas, aunque reconocía que su existencia no podía ser detectada debido a la invariancia de las leyes físicas en todos los sistemas de referencia inerciales. Extendió y formuló las transformadas de Lorentz asegurando su aplicabilidad a todas las coordenadas espaciotemporales, utilizando una notación que implicaba una unificación del tiempo y el espacio, preparando el terreno para el trabajo posterior de Minkowski<sup>27</sup>. Además, para la simultaneidad introdujo el concepto de "tiempo local" para explicar cómo dos observadores en movimiento relativo pueden medir diferentes tiempos para el mismo evento, afirmó que las leyes de la física deben ser las mismas en todos los sistemas de referencia inerciales (Poincaré, La mesure du temps, 1898). Las contribuciones de Poincaré fueron esenciales para el desarrollo de la relatividad especial atribuida a Einstein.

Albert Einstein, apoyándose en los estudios de las ecuaciones de Maxwell y sobre todo de Poincaré, entre otros, publicó su teoría de la relatividad especial en un artículo titulado "Zur Elektrodynamik bewegter Körper", en 1905, donde presentó su teoría de la relatividad especial, la cual defiende dos principios fundamentales para sistemas inerciales:

- Principio de la relatividad: Einstein postuló que las leyes de la física son las mismas para todos los observadores en cualquier estado de movimiento uniforme, no acelerado, como ya había descrito Poincaré. Esto significa que no hay un sistema de referencia absoluto y que no se puede distinguir entre un estado de reposo y un estado de movimiento uniforme sin referirse a un punto de referencia externo. Tomando como ejemplo a una persona dentro de una caja, la cual viaja a velocidad constante, esta no experimenta aceleración. La persona dentro de la caja no sabe si está en movimiento o en reposo, ya que no experimenta ningún tipo de fuerza. Por eso no podemos distinguir un movimiento uniforme de uno en reposo sin un observador externo.
- Velocidad de la luz constante: Einstein también coge la idea de Poincaré acerca de que la velocidad de la luz en el vacío es constante para todos los marcos de referencia inerciales, independientemente de la velocidad relativa del observador y la fuente de luz. El tiempo y el espacio son relativos y pueden cambiar según el estado de movimiento del observador.

---

<sup>26</sup> **Henri Poincaré** (1854-1912) fue un matemático, físico y filósofo francés, conocido por sus contribuciones fundamentales a la teoría de la relatividad, la topología y la teoría del caos.

<sup>27</sup> **Hermann Minkowski** (1864-1909) fue un matemático alemán que proporcionó una formulación matemática esencial para la teoría de la relatividad especial de Einstein.

En 1908, Minkowski publica su artículo “Raum und Zeit” ayudando a clarificar y formalizar la teoría de la relatividad especial de Einstein. A partir de la idea de Poincaré, propuso que el espacio y el tiempo deben considerarse como una sola entidad cuatridimensional, conocida como espacio-tiempo. Utilizó la representación de conos de luz para ilustrar la causalidad en el espacio-tiempo. Reformuló las transformaciones de Lorentz en términos de geometría del espacio-tiempo. Esto permitió una mejor comprensión de cómo se relacionan las coordenadas de diferentes sistemas de referencia inerciales (Minkowski, 1908).

### Factor de Lorentz

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

### Transformaciones de Lorentz:

$$t' = \gamma \cdot \left( t - \frac{v \cdot x}{c^2} \right)$$

$$x' = \gamma \cdot (x - v \cdot t)$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$\gamma$ : Factor de Lorentz

$v$ : Velocidad relativa entre los sistemas  $[m/s]$

$c$ : Velocidad de la luz  $[3 \cdot 10^8 m/s]$

$t$ : Coordenada temporal en el sistema de referencia original  $[s]$

$(x, y, z)$ : Coordenadas espaciales en el sist. de ref. original  $[m]$

$t'$ : Coordenada temporal en el sist. de ref. en movimiento  $[s]$

$(x', y', z')$ : Coordenadas espaciales en el sist. de ref. en movimiento  $[m]$

De las transformaciones de Lorentz refinadas por Poincaré y Minkowski se puede deducir:

- Dilatación del tiempo. El tiempo va más despacio para un observador en movimiento que para uno en reposo. Esta dilatación del tiempo se vuelve significativa a velocidades cercanas a la velocidad de la luz.
- Contracción de longitud. Los objetos en movimiento se contraen en la dirección de su movimiento para observador en reposo, y también un objeto en reposo para un observador en movimiento.
- Relatividad de la simultaneidad. Dos eventos que son simultáneos para un observador en reposo pueden no serlo para un observador con movimiento relativo. Esto significa que no hay un concepto absoluto de simultaneidad en la teoría de la relatividad especial.

Tras la postulación de la relatividad, las ecuaciones de Maxwell fueron incorporadas a la teoría relativista por Jefimenko<sup>28</sup>, en 1966, en su publicación “Electricity and Magnetism: An Introduction to the Theory of Electric and Magnetic Fields”. Las ecuaciones de Jefimenko describen los campos eléctricos y magnéticos producidos por distribuciones de carga y corriente. Se utilizan para estudiar fenómenos electromagnéticos en sistemas no estacionarios. Las ecuaciones relacionan el campo eléctrico y el campo magnético en función de las densidades de carga y de corriente, así como las velocidades relativas entre las cargas y el observador, sosteniendo que el campo magnético no se crea a causa del campo eléctrico y viceversa (Jefimenko, 1966).

Campo eléctrico:

$$E(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{\rho(\mathbf{r}', tr)}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^2} (\mathbf{r} - \mathbf{r}') d\tau' + \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{J(\mathbf{r}', tr)}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} d\tau'$$

$E(\mathbf{r}, t)$ : Campo eléctrico [V/m]

$\rho$ : Densidad de carga [C/m<sup>3</sup>]

$J$ : Densidad de corriente [A/m<sup>2</sup>]

$\mathbf{r} - \mathbf{r}'$ : Vectores de posición [m]

$tr$ : Tiempo retardado [s]

$\epsilon_0$ : Permitividad del vacío [8.854 \* 10<sup>-12</sup> F/m]

Campo magnético:

$$B(\mathbf{r}, t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{J(\mathbf{r}', tr)}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^2} \times (\mathbf{r} - \mathbf{r}') d\tau'$$

$B(\mathbf{r}, t)$ : Campo magnético [T]

$\mu_0$ : Permeabilidad del vacío [4π \* 10<sup>-7</sup> H/m]

$J$ : Densidad de corriente [A/m<sup>2</sup>]

$\mathbf{r} - \mathbf{r}'$ : Vectores de posición [m]

$tr$ : Tiempo retardado [s]

---

<sup>28</sup> **Oleg D. Jefimenko** (1922-2009) fue un destacado físico ucraniano-estadounidense conocido por sus contribuciones a la teoría electromagnética.

Jefimenko desarrolla sus ecuaciones para calcular los campos eléctrico y magnético en una región en función de la densidad de corriente y de la densidad de carga presente. Además, lo hace tomando las posiciones relativas entre los sistemas que intervienen, añadiendo la formulación a la teoría de la relatividad. También sostendría que un campo magnético no produce un campo eléctrico y viceversa, aunque ambos son la distribución de carga y su movimiento, aunque la causa de ambos son las distribuciones de carga y su movimiento (Jefimenko, 1966).

Prueba de lo significativo que fueron las ecuaciones de Maxwell pueden ser las palabras de Einstein: «Una época científica acabó y otra empezó con Maxwell [...] el trabajo de James Clerk Maxwell cambió el mundo para siempre» (Einstein, *Maxwell's Influence on the Development of the Conception of Physical Reality*, 1931).

Algunos experimentos que pueden demostrar la teoría de la relatividad, aparte del experimento Michelson-Morley, como la dilatación del tiempo en experimentos con relojes atómicos. Los relojes atómicos enviados a bordo de aviones o satélites y luego comparados con relojes en la Tierra muestran que los relojes en movimiento experimentan una dilatación del tiempo, debido a su velocidad relativa con los observadores en reposo en la Tierra, es decir, el tiempo pasa más despacio si estas en movimiento.



## Conclusiones

Para abordar este apartado creo necesario aclarar la diferencia entre hipótesis, ley y teoría.

- Una hipótesis es una suposición sobre cómo funciona algún aspecto del mundo natural, que puede ser probada mediante observaciones y experimentos y debe ser posible diseñar un experimento o una observación que pueda demostrar que la hipótesis es falsa.
- Una ley científica describe de manera concisa y generalmente matemática los fenómenos observados en la naturaleza sin explicar por qué ocurren.
- Una teoría científica, en cambio, ofrece una explicación comprensiva y bien fundamentada de por qué y cómo ocurren estos fenómenos, integrando y conectando múltiples leyes, observaciones y hechos.

En el trabajo los autores presentes intentan dar respuesta a sus observaciones, para ello postulan hipótesis como:

- Oersted planteando el conflicto eléctrico donde la electricidad positiva mueve el polo norte del imán y la electricidad negativa el polo sur.

Oersted decide tomar este criterio de electricidad negativa y positiva, pero es más compleja que si solo consideramos la electricidad positiva que mueve el polo norte, criterio similar al de hoy en día.

- Ampère defendiendo que la corriente es la causante de todos los fenómenos electromagnéticos, postulando que los imanes presentan magnetismo por la presencia de estas corrientes en su interior.

Se pueden describir los fenómenos a través de la densidad de corriente y la distribución de carga, lo que aporta fuerza a la hipótesis de Ampère.

- Faraday diferenciando entre electricidad y magnetismo, dando a conocer los “polos verdaderos”, las líneas de campo magnético, y profundizar más en las rotaciones electromagnéticas descritas previamente por Arago y su disco.

Las hipótesis de inducción, campo y rotación electromagnética fueron basadas mayoritariamente en la experimentación, fundamentales en la elaboración de la teoría electromagnética.

También, en referencia a las hipótesis intentan darle una explicación matemática postulando leyes:

- Las fuerzas de Ampère y de Grassmann, donde Ampère interpreta las fuerzas presentes como interacción directa entre corrientes y Grassmann como la interacción de un campo magnético con una

corriente eléctrica. La formulación de Ampère nos proporciona una visión más sencilla para comprender como interaccionan entre sí las corrientes eléctricas, permitiendo la resolución de problemas con alta simetría y con ella se puede calcular las fuerzas longitudinales. Mientras que con Grassmann podremos calcular la fuerza, aunque no exista simetría, además tiene en cuenta la variación de los campos con el tiempo y no se puede calcular las fuerzas longitudinales.

Ambos cumplen con las observaciones y los planteamientos, siendo una ley más robusta la de Ampère debido a que cumple con la fuerza longitudinal entre elementos de corriente, y por no tener que en cuenta la fuerza que ejerce parte del circuito sobre sí mismo.

El conjunto de hipótesis y leyes pueden dar explicación a las observaciones, dando lugar a la teoría electromagnética:

- Maxwell redactando un conjunto de leyes que unirían la electricidad y el magnetismo, sintetizadas por Heaviside y reescritas por Whittaker tomando el espacio vacío, rompiendo con la causalidad de inducción magnética y pudiendo describir una fuerza diagonal entre conductores cargados. Casi un siglo después de Maxwell, Jefimenko tendría en cuenta la posición y velocidad relativas y sostendría que un campo magnético no produce un campo eléctrico y viceversa, ya que ambos pueden describirse con la distribución de carga y su movimiento. Después de la postulación de la teoría de la relatividad Jefimenko describe las ecuaciones de Maxwell en función de las densidades de carga y de corriente, así como las velocidades relativas entre las cargas y el observador.

La unión de diferentes hipótesis y leyes de la física óptica con la teoría electromagnética derivó en la teoría de la relatividad especial:

- Michelson, Morley, FitzGerald, Lorentz y Poincaré, defendiendo la existencia del éter en sus postulados, aportan las bases que recopilaría Einstein en su trabajo sobre relatividad especial, atribuyéndosele la autoría de dicha teoría, aunque sus bases habían sido postuladas previamente, sobre todo por Poincaré. Además, Minkowski aclara cómo se relacionan entre sí las coordenadas de diferentes sistemas de referencia inerciales y añade la dimensión temporal las dimensiones espaciales.

Maxwell a diferencia de Einstein creó sus leyes en base a las experiencias pasadas de sus colegas mientras que Einstein hizo un trabajo de recopilación, sobre todo de Poincaré, y además tuvo que ser aclarado por Minkowski.

Son estos detalles colaborativos, de revisiones, réplicas, análisis crítico e informe de resultados, cuya finalidad es la búsqueda de la verdad, favorece la evolución del conocimiento, permitiendo pasar de las hipótesis y leyes a la elaboración de un marco teórico que de explicación a los fenómenos presentes en él. En este trabajo hemos podido observar todo ello, y que todos tienen parte de verdad y parte errada, ya que al ser algo no perfectamente observable a nivel atómico, debe de ser la razón y el pensamiento crítico que den luz a las hipótesis, y estas se refinarán trabajando en esos conceptos y aportando leyes, hasta llegar a los postulados teóricos.

Aunque no haya sido mencionado en el trabajo, la influencia filosófica marca el pensamiento de los distintos autores dependiendo de la época. Vemos como a principios del siglo XIX autores como Oersted, Ampère y Faraday, entre otros, están marcados por la época de la Ilustración donde predomina el racionalismo y el empirismo. A finales de este siglo la aplicación estricta del método científico llevó a la teoría electromagnética y la teoría de la relatividad. La filosofía europea desde finales del siglo XVIII hasta principios del siglo XX proporcionó marcos conceptuales, metodológicos y epistemológicos que moldearon profundamente el desarrollo de las ciencias naturales y sociales. Estas influencias ayudaron a establecer el rigor científico, promover enfoques interdisciplinarios, y considerar tanto la objetividad como la subjetividad en la investigación científica.

A lo largo de la historia, podemos ver como se intenta dar con una teoría que pueda dar explicación a todo, desde Newton con su teoría gravitacional, la cual se mantuvo como una teoría que podía explicarlo todo, llamémosla “la teoría del todo”. El paso del tiempo y de nuevos hallazgos permitieron evidenciar que esto no era como se creía, llegando a la teoría de la relatividad, con la que se creyó, por una parte del mundo científico, que se complementaría con la de Newton para forjar “la teoría del todo”, pero a día de hoy con el auge de la física cuántica es más que evidente que esto no permite dar explicación a muchos fenómenos, surgiendo en la comunidad científica la idea de que “la teoría del todo” está incompleta y que aún desconocemos verdades que puedan llegar a unificar el conjunto de las teorías más importantes postuladas a lo largo de nuestra historia.

Algunos temas que se han visto en el trabajo siguen abiertos como:

- La modelización de los fenómenos electromagnéticos que está en continuo avance.
- Las discrepancias con la teoría de campo magnético.
- La existencia de monopolos magnéticos.
- Críticas a la teoría de la relatividad.

## Fórmulas

### Ley Biot-Savart:

$$d\vec{B} = \left(\frac{\mu_0}{4\pi}\right) * \frac{(d\vec{I} \times \hat{r})}{r^2}$$

$B$ : Campo magnético o (Tesla) [ $T = N \cdot A^{-1} \cdot m^{-1}$ ]

$\mu_0$ : Permeabilidad magnética del vacío [ $T \cdot m/A$ ]

$I$ : Intensidad del conductor [ $A = C/s$ ]

$r$ : Distancia hasta el punto a analizar [ $m$ ]

### Fuerza magnética:

#### Carga

$$\vec{F}_m = q \cdot (\vec{v} \times \vec{B})$$

$\vec{F}_m$ : Fuerza magnética [ $N$ ]

$q$ : Carga de la partícula [ $C$ ]

$E$ : Campo eléctrico en la partícula [ $V/m$ ]

$v$ : Velocidad relativa entre cargas [ $m/s$ ]

$B$ : Campo magnético en la partícula [ $T$ ]

#### Intensidad

$$\vec{F}_m = I \cdot (\vec{L} \times \vec{B})$$

$\vec{F}_m$ : Fuerza magnética [ $N$ ]

$I$ : Intensidad del conductor [ $A$ ]

$L$ : Longitud del hilo conductor [ $m$ ]

$B$ : Campo magnético [ $T$ ]

### Flujo magnético

$$\phi = \vec{B} \cdot \vec{S} \text{ (producto escalar)} = |\vec{B}| \cdot |\vec{S}| \cdot \cos(\alpha)$$

$B$ : Campo magnético en la partícula [ $T$ ]

$S$ : Superficie [ $m^2$ ]

$\phi$ : Flujo magnético (Weber) [ $Wb = T \cdot m^2$ ]

$\alpha$ : Ángulo formado de  $B$  con  $S$  [ $^\circ$ ][rad]

### Ley Faraday-Lenz

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} \cdot N = -\frac{dI}{dt} \cdot L$$

$\varepsilon$ : fuerza electromotriz (Voltios) [V]

$\Phi$ : Flujo magnético (Weber) [Wb = T·m<sup>2</sup>]

$N$ : Número de espiras

$\mu$ : Permeabilidad magnética del vacío [T · m/A]

$I$ : Intensidad del conductor [A = C/s]

$L$ : Inductancia del circuito [H]

### Corriente inducida

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

$\varepsilon$ : fuerza electromotriz (Voltios) [V]

R: Resistencia [ $\Omega$ ]

I: Corriente [A]

### Ecuaciones de Maxwell:

- Ley de Gauss para el campo eléctrico:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$$

$\vec{\nabla} \cdot \vec{E}$ : Divergencia del campo eléctrico

$\vec{E}$ : Campo eléctrico [N/C ó V/m]

$\rho$ : Densidad de carga eléctrica [C/m<sup>3</sup>]

$\varepsilon_0$ : Permitividad del vacío [F/m]

- Ley de Gauss para el campo magnético

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

$\vec{\nabla} \cdot \vec{B}$ : Divergencia del campo magnético

$\vec{B}$ : Campo magnético [T ó Wb/m<sup>2</sup>]

- Ley de Faraday:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$\vec{\nabla} \times \vec{E}$ : Rotacional del campo eléctrico

$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ : Variación temporal del campo magnético [T/s]

- Ley de Ampère-Maxwell:

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{J} + \mu_0 \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

$\vec{\nabla} \times \vec{B}$ : Rotacional del campo magnético [ $\frac{T \cdot m^2}{A}$  ó  $\frac{Wb}{A}$ ]

$\mu_0$ : Permeabilidad del vacío [ $4\pi \times 10^{-7}$  H/m]

$\vec{J}$ : Densidad de corriente [ $A/m^2$ ]

$\frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$ : Variación temporal del campo eléctrico [ $\frac{V}{m \cdot s}$ ]

Ecuaciones de Whittaker:

- Potencial magnético.

$$B = \nabla \times A$$

$B$ : Potencial magnético [ $T \cdot m$  ó  $\frac{Wb}{m}$ ]

$A$ : Potencial vectorial

- Potencial eléctrico.

$$E = -\nabla\phi - \frac{\partial A}{\partial t}$$

$E$ : Potencial eléctrico [ $V$  ó  $\frac{J}{c}$ ]

$\phi$ : Potencial escalar

- Ecuaciones de Maxwell en el espacio libre ( $\rho=0$ ;  $J=0$ ).

- o La primera ley

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0$$

- o La segunda ley

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

- o La ley de Faraday-Lenz

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

- o La ley de Ampère

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

- La ecuación de Poisson para el potencial escalar:

$$\nabla^2 \phi = -\frac{\rho}{\epsilon_0}$$

- La ecuación de onda para el potencial vectorial:

$$\nabla^2 A - \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} = -\mu_0 \cdot J$$

### Factor de Lorentz

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$\gamma$ : Factor de Lorentz

$v$ : Velocidad relativa entre los sistemas [m/s]

$c$ : Velocidad de la luz [3·10<sup>8</sup> m/s]

### Transformaciones de Lorentz:

$$t' = \gamma \left( t - \frac{v \cdot x}{c^2} \right)$$

$$x' = \gamma (x - v \cdot t)$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$t$ : Coordenada temporal en el sistema de referencia original [s]

$(x, y, z)$ : Coordenadas espaciales en el sistema de referencia original [m]

$t'$ : Coordenada temporal en el sistema de referencia en movimiento [s]

$(x', y', z')$ : Coordenadas espaciales en el sist. de referencia en movimiento [m]

$\gamma$ : Factor de Lorentz

$v$ : Velocidad relativa entre los sistemas [m/s]

$c$ : Velocidad de la luz [3·10<sup>8</sup> m/s]

Ecuaciones de Jefimenko:

- Campo eléctrico:

$$E(r, t) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{\rho(r', tr)}{|r - r'|^2} (r - r') d\tau' + \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{J(r', tr)}{|r - r'|} d\tau'$$

$E(r, t)$ : Campo eléctrico [V/m]

$\rho$ : Densidad de carga [C/m<sup>3</sup>]

$J$ : Densidad de corriente [A/m<sup>2</sup>]

$r - r'$ : Vectores de posición [m]

$tr$ : Tiempo retardado [s]

$\epsilon_0$ : Permitividad del vacío [8.854 \* 10<sup>-12</sup> F/m]

- Campo magnético:

$$B(r, t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{J(r', tr)}{|r - r'|^2} \times (r - r') d\tau'$$

$B(r, t)$ : Campo magnético [T]

$\mu_0$ : Permeabilidad del vacío [4 $\pi$  \* 10<sup>-7</sup> H/m]

$J$ : Densidad de corriente [A/m<sup>2</sup>]

$r - r'$ : Vectores de posición [m]

$tr$ : Tiempo retardado [s]



## Bibliografía

- Ampère, A. M., & Savart, F. (1821). Notes relatives au mémoire de M. Faraday. *Annales de Chimie et de Physique*, 18, 370-379.
- Ampère, A.-M. (1820). Memoria sobre la acción mutua de dos corrientes eléctricas, una corriente eléctrica y un imán o el globo terrestre, y entre dos imanes. *Annales de Chimie et de Physique*, 15, 59-75, 170-218.
- Ampère, A.-M. (1821). Carta dirigida a Speyert Van Der Eyk. *Correspondance du Grand Ampère*. París.
- Ampère, A.-M. (1822). Recopilación. *Recopilación de observaciones, cartas y obras periódicas, relacionadas con la acción mutua entre dos corrientes, corriente e imán o la tierra, y la de dos imanes*. París.
- Ampère, A.-M. (1827). *Théorie mathématique des phénomènes électro dynamiques uniquement déduit de l'expérience* (Vol. 4). París: Memories de L'Académie Royale des Sciences de L'Institut de France.
- Ampère, A.-M. (1831). Expériences sur les courants électriques produits par l'influence d'un autre courant. (A.-C. Becquerel, Ed.) *Annales de Chimie et de Physique*, 48, 405-412.
- Andalucía, J. d. (s.f.). 6. *Comparativa de los campos gravitatorio, eléctrico y magnético*. Obtenido de [https://edeia.juntadeandalucia.es/bancorecursos/file/9e4b9ec3-0d78-40c6-b59c-34218bf8c4b7/1/es-an\\_2018070112\\_9151555.zip/6\\_comparativa\\_de\\_los\\_campos\\_gravitatorio\\_elctrico\\_y\\_magntico.html?temp.hn=true&temp.hb=true](https://edeia.juntadeandalucia.es/bancorecursos/file/9e4b9ec3-0d78-40c6-b59c-34218bf8c4b7/1/es-an_2018070112_9151555.zip/6_comparativa_de_los_campos_gravitatorio_elctrico_y_magntico.html?temp.hn=true&temp.hb=true)
- Andalucía, J. d. (s.f.). *Experimento de Michelson y Morley*. Obtenido de [https://edeia.juntadeandalucia.es/bancorecursos/file/0a935f70-3491-46c8-bfcb-0e0f3e22ca73/1/es-an\\_2016112913\\_9123724.zip/ODE-38a0a79f-fe02-32a2-bf4e-2d8fd1764421/experimento\\_de\\_michelson\\_y\\_morley](https://edeia.juntadeandalucia.es/bancorecursos/file/0a935f70-3491-46c8-bfcb-0e0f3e22ca73/1/es-an_2016112913_9123724.zip/ODE-38a0a79f-fe02-32a2-bf4e-2d8fd1764421/experimento_de_michelson_y_morley)
- Atom. (2015). *Ley de Biot Savart*. Obtenido de <http://leydebiotysavart.blogspot.com/>
- Berkson, W. (1985). *Las teorías de los campos de fuerza. Desde Faraday hasta Einstein*. Madrid: Alianza.
- Blondel, C., & Wolff, B. (2009a). *Ampère jette les bases de l'électrodynamique*. Obtenido de <http://www.ampere.cnrs.fr/parcourspedagogique/zoom/courant/electrodynamique/index.php>
- Blondel, C., & Wolff, B. (2009b). *¿La force d'Ampère, une formule obsolète?* Obtenido de <http://www.ampere.cnrs.fr/histoire/parcours-historique/lois-courants/force-obsolete>

- Blondel, C., & Wolff, B. (2011). *Faraday, Ampère, et le mystère des rotations continues*. Obtenido de <http://www.ampere.cnrs.fr/histoire/parcours-historique/lois-courants/rotations-continues>
- Bueno, M., & Torres Assis, A. K. (2015). *Cálculo de Indutância e de Força em Circuitos Elétricos* (2ª ed.). Montreal: C. Roy Keys Inc.
- Chaces, W., & Moore, H. (1959). Exploding Wires. *Plenum Press*, 1, 7-16.
- Einstein, A. (1905). Zur Elektrodynamik bewegter Körper. *Annalen der Physik*, 4, 891-921.
- Einstein, A. (1931). Maxwell's Influence on the Development of the Conception of Physical Reality. En T. Torrance, & T. F. Torrance (Ed.), *James Clerk Maxwell, A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field* (T. F. Torrance, Trad., págs. 29-32). Edinburgh: Scottish Academic Press.
- Faraday, M. (1821). Historical Sketch of Electro-magnetism. *The Annals of Philosophy*, Vol. II and Vol. III. (8), 480 pp. a. 3 plates. + VIII, 480 pp. Faraday's paper: pp. 195-200, 274-290.
- Faraday, M. (1822a). On some new Electro-Magnetical Motions, and on the theory of Magnetism. *Quarterly Journal of Sciences, Literature and the Arts*, XII, 74-95.
- Faraday, M. (1822b). Carta dirigida a Ampère. *Correspondance du Grand Ampère (1943)*, III, 928-931. París: Gauthier-Villars.
- Faraday, M. (1832a). Experimental researches in electricity. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 122, 125-162.
- Faraday, M. (1832b). The Bakerian Lecture: Experimental Researches in Electricity. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 163-194.
- Feito, J. R. (1991). *El concepto de estado electro-tónico en Faraday*. Universitat de Barcelona. Barcelona: Universidad de Barcelona.
- Felipe, P. C. (2016). *Campo magnético*. Obtenido de <https://www.sanfelipe.edu.uy/wp-content/uploads/2016/04/RE-Resumen-campo-B.pdf>
- FitzGerald, G. F. (1889). The Ether and the Earth's Atmosphere. *Science*, 13, 328-390.
- Fizeau, A. (1850). Sur les hypothèses relatives à l'éther lumineux. *L'académie des sciences*, 90-92.
- García, Á. F. (2010). *Física con ordenador*. Obtenido de <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/default.htm>
- Gauses, C. F., & Weber, W. (1838-1843). *Resultate aus den Beobachtungen des Magnetischen Vereins*. Göttingen: Dieterischen Buchhandlung.
- Gauss, C. F. (1832). *Intensitas vis magneticae terrestris ad mensuram absolutam revocata*. Göttingen : Göttingen Dieterich.
- Hertz, H. (1888). *On Electromagnetic Effects Produced by Electrical Disturbances in Insulators*. Berlín: Berlin Academy.

- Hofmann, J. R. (1987). Ampère, Electrodynamics and Experimental Evidence. *Osiris*, 3, 45-76.
- Holguin, A. (5 de Noviembre de 2005). Relatividad especial. *CUADERNOS UNIMETANOS*, 54-64. Venezuela. Obtenido de file:///C:/Users/%C3%93scar/Downloads/Dialnet-RelatividadEspecial-3996145-1.pdf
- Jefimenko, O. D. (1966). *Electricity and Magnetism: An Introduction to the Theory of Electric and Magnetic Fields*. New York: Electret Scientific.
- Lorentz, H. (1937). Electromagnetic Phenomena in a System Moving with any Velocity Less than that of Light. En H. Lorentz, *Collected Papers* (págs. 172-197). Amsterdam: Royal Acad. Amsterdam.
- Martins, R. d. (1986). Ørsted e a descoberta do eletromagnetismo. *Cadernos de História e Filosofia da Ciência*, 10, 89-114.
- Maxwell, J. C. (1865). A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field. *Royal Society*, 155, 459-512.
- Maxwell, J. C. (1873). *A Treatise on Electricity and Magnetism*. Oxford: Clarendon Press. Obtenido de <https://archive.org/details/electricandmag02maxwrich/page/n11/mode/2up>
- Michelson, A. A., & Morley, E. W. (1887). On the Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether. *a American Journal of Science.*, 34, 333-345.
- Minkowski, H. (1908). Raum und Zeit. *Jahresberichte der Deutschen Mathematiker*, 18, 75-88.
- Moebs, W., Ling, S. J., & Sanny, J. (2021). *Física universitaria volumen 3*. Obtenido de OpenStax: <https://openstax.org/books/f%C3%ADsica-universitaria-volumen-3/pages/5-introduccion>
- Ørsted, H. C. (1820). Expériences sur l'effet du conflict électrique sur l'aiguille aimantée. *Annales de chimie et de physique*, 14, 417-425.
- Ørsted, H. C. (1820). Expériences sur l'effet du conflict électrique sur l'aiguille aimantée. *Annales de chimie et de physique*, 14, 417-425.
- Poincaré, H. (1898). La mesure du temps. *Revue de Métaphysique et de Morale*, 6, 1-13.
- Poincaré, H. (1905). Sur la dynamique de l'électron. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences*, 140, 1504-1508.
- Reingold, N. (1972). *The Papers of Joseph Henry*, . (N. Reingold, Ed.) Michigan: Smithsonian Institution Press.
- Ross, S. (1965). The Search for Electromagnetic Induction: 1820-1831. *Notes and Records of the Royal Society of London*, 20, 184-219.
- Sánchez Ron, J. M. (2006). *J. C. Maxwell: Materia y movimiento*. Barcelona: Crítica.

- Stauffer, R. C. (1957). Speculation and Experiment in the Background of Oersted's Discovery of Electromagnetism. *The University of Chicago Press*, 48, 33-50.
- Steinle, F. (1995). Looking for a "Simple Case": Faraday and Electromagnetic Rotation. *History of Science*, 33, 179-202.
- Turnbull, G. (Julio de 2013). *Maxwell's equations* . Obtenido de Proceedings of the IEEE: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6532357>
- Wangness, R. K. (2001). *Campos electromagnéticos*. Ciudad de Mexico: Limusa Noriega.
- Weber, W. (1846). *Electrodynamische Maassbestimmungen über ein allgemeines Grundgesetz der elektrischen Wirkung*. Leiozig: Jablo-nowskischen Gesellschaft.
- Whittaker, E. T. (1917). *A Treatise on the Analytical Dynamics of Particles and Rigid Bodies*. Cambridge: University Press.
- Williams, L. P. (1983). What were Ampere's earliest discoveries in electrodynamics? *Isis*, 74, 492-508.

---

<sup>i</sup> Botella de Leyden: Es un dispositivo eléctrico realizado con una botella de vidrio que permite almacenar cargas eléctricas. Fue el primer tipo de condensador eléctrico

<sup>ii</sup> Galvanómetro: Dispositivo que consistía en una brújula colocada en el interior de una bobina de alambre. La desviación de la brújula permitía saber si circulaba corriente eléctrica y la magnitud.

<sup>iii</sup> Electrómetro: Aparato que permite medir la diferencia de potencial (tensión) que existe entre dos puntos. La deflexión de una aguja o un sistema óptico indica la magnitud de la carga.