

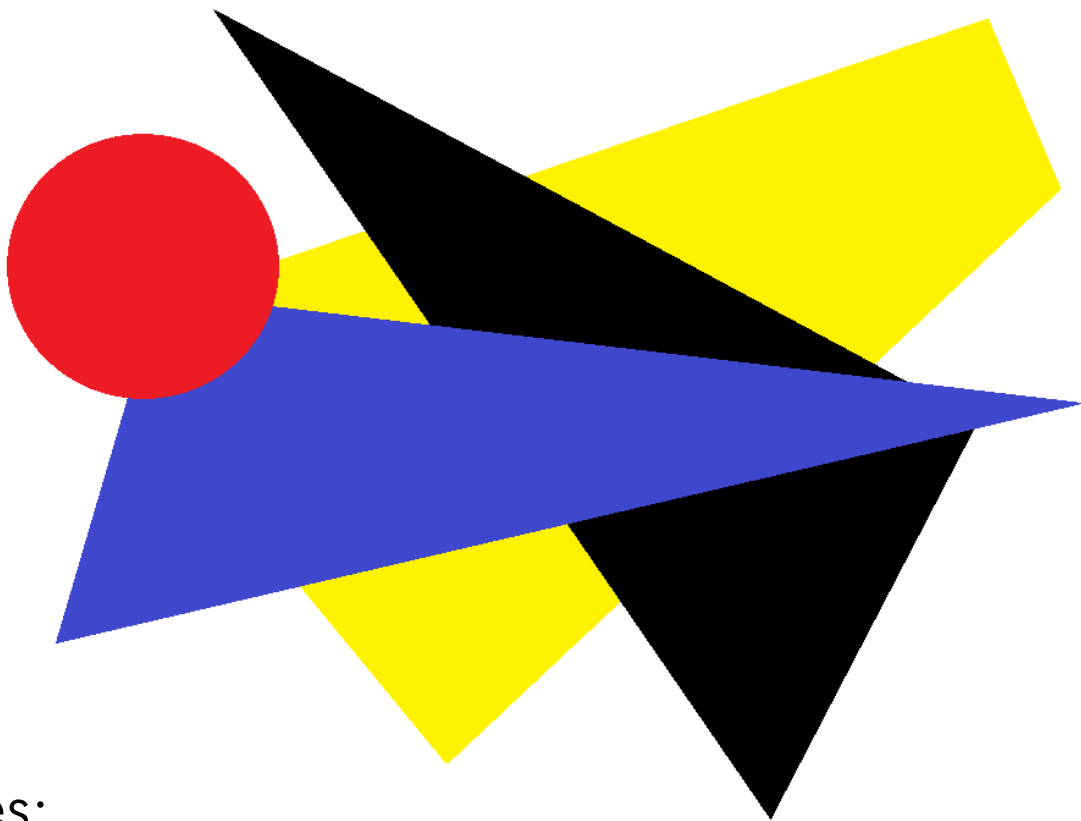
Trabajo Fin de Grado

# Explorando la Electrodinámica: Los primeros experimentos

Por Carlos Martín García

Grado en Física de la Universidad de Sevilla

Curso 2020/21



Tutores:

María de Paz Amérigo

Alberto Tomás Pérez Izquierdo

Dedicado a todas aquellas personas que en algún momento  
se sentaron a ayudarme en todo aquello que no entendía.  
A Carmen, Miguel, Raquel, Anto, Elisa, Juan y Chari.

# Índice

Resumen.....	1
Motivación y objetivos.....	2
Metodología.....	3
Desarrollo de contenido .....	4
1. Introducción: Del ámbar al electromagnetismo.....	4
1.1 Electricidad y magnetismo anteriores al siglo XIX.....	4
1.2 La pila voltaica.....	5
1.3 Los restos de la Ilustración en la Europa decimonónica.....	7
1.4 El experimento de Ørsted: primer indicio del electro-magnetismo .....	9
2. Primeros pasos del electromagnetismo: André-Marie Ampère .....	12
2.1 El terremoto del electromagnetismo en Europa.....	12
2.2 “Hechos generales”: los experimentos exploratorios de Ampère.....	14
2.3 Refinamiento y cuantificación: el albor de una nueva teoría.....	23
3. La diversificación de la electrodinámica: Michael Faraday .....	29
3.1 Primer contacto con corrientes eléctricas en Reino Unido.....	29
3.2 La rotación como fundamento del electromagnetismo.....	30
3.3 El descubrimiento de la inducción electromagnética .....	33
4. Primeros inventos derivados del electromagnetismo .....	35
4.1 El galvanómetro.....	36
4.2 El electroimán .....	37
4.3 El generador de corriente .....	39
Conclusiones .....	41
Fuentes de las imágenes.....	42
Bibliografía.....	42
Anexo I .....	45

## Resumen

En este trabajo hemos realizado una recopilación de los primeros dispositivos experimentales en el campo de la electrodinámica, abarcando los trabajos más relevantes de los científicos Volta, Ørsted, Ampère y Faraday, teniendo en cuenta su contexto histórico y cultural, fundamental para entender la concepción que tenía cada uno acerca de la Naturaleza y la ciencia, pues son imprescindibles para comprender los avances que se derivaron de estas.

En el primer apartado hablaremos de la invención de la pila y el descubrimiento del primer fenómeno que conjugaba electricidad y magnetismo; en el segundo, sobre los avances obtenidos gracias a la vanguardia parisina de la *Académie des Sciences*; en el tercero, sobre los diversos campos que se abrieron gracias al estudio de la corriente eléctrica, concretamente en Londres, de la mano de Michael Faraday; y, por último, en el cuarto expondremos tres inventos desarrollados a lo largo de la primera mitad del siglo XIX que fueron consecuencia directa de las investigaciones de los científicos de este trabajo.

## **Motivación y objetivos**

El estudio de la historia y filosofía de la ciencia es una parte importante en la formación de futuros investigadores, aunque esta, por lo general, no goce de un estatus relevante en los planes de estudio. Estas disciplinas son fundamentales para comprender los procesos que han llevado a las sociedades científicas de cada momento, incluido el actual, al punto en el que se encuentren, y permiten asimilar de forma profunda la idea de que la ciencia es un proceso que se encuentra en constante conflicto y renovación.

Este trabajo, por lo tanto, tiene como objetivo presentar de forma cronológica, dentro de las posibilidades que permiten las fuentes, el proceso llevado a cabo por las primeras personas del mundo contemporáneo que tuvieron que lidiar con la unión de fenómenos naturales en apariencia independientes. Con esto, queremos mostrar cómo la ciencia requiere de redes que difundan descubrimientos, cómo la creación de una teoría está ligada a la especulación “a ciegas”, al abandono de ideas preconcebidas bien asentadas en el imaginario colectivo y a la influencia que sobre la sociedad cualquier avance científico puede tener. En definitiva, queremos exponer una narrativa que pueda ayudar al lector a comprender el avance científico como algo humilde, imperfecto y realista.

## Metodología

Este ha sido un trabajo de carácter bibliográfico dentro del entorno de una facultad de ciencias naturales, por lo que la metodología seguida para su realización ha consistido, mayoritariamente, en la lectura de una serie de documentos historiográficos de la ciencia. Además, como forma de trasladar al mundo actual lo que se estaba observando en cada momento, los experimentos tienen una, por lo general, breve explicación formal mediante los criterios, leyes y herramientas de las que disponemos actualmente. No obstante, este trabajo busca estudiar más la historia y filosofía de la ciencia que el formalismo matemático, por lo que se intentará no extender la explicación formal más de lo estrictamente necesario o se proporcionará una solución esquemática.

Las líneas generales en este TFG han estado considerablemente guiadas por el libro *Exploratory experiments*<sup>1</sup>, pues de él se ha extraído la cronología de los experimentos llevados a cabo y parte de la bibliografía utilizada en cada sección. Además, se han utilizado libros generalistas para buscar experimentos y poder tener una idea del momento histórico y científico de cada época<sup>2-4</sup>, así como un libro actual para desarrollar el formalismo de manera apropiada<sup>5</sup>.

Para la primera parte, se ha leído acerca del contexto sociocultural de Ørsted<sup>6</sup>, así como los escritos originales de Ørsted<sup>7,8</sup> sobre electromagnetismo. Además, para entender más a fondo los acontecimientos siguientes a la invención de la pila, otros textos han sido consultados<sup>9</sup>.

Respecto a la segunda parte, el desarrollo de la misma ha venido dado por la propia memoria que redactó Ampère tras presentar sus experiencias en la *Académie des Sciences*<sup>10,11</sup>. De forma adicional, se han consultado fuentes aparte que pudiesen explicar el contexto de los experimentos<sup>12</sup>.

En el caso de la realización de la tercera parte, hemos tomado la información fundamental directamente de los escritos de Faraday<sup>13-15</sup>, complementándolos con otros que permitiesen comprender el entorno en el que se realizaron<sup>16,17</sup>.

Por último, para la cuarta parte hemos realizado un compendio de diferentes inventos derivados de las investigaciones de Ampère y Faraday con la documentación usada anteriormente.

## Desarrollo de contenido

### 1. Introducción: Del ámbar al electromagnetismo

#### 1.1 Electricidad y magnetismo anteriores al siglo XIX

De entre las cuatro interacciones fundamentales de la naturaleza, la electromagnética fue la primera en observarse de forma inteligible; la gravedad era invisible por omnipresente y las interacciones nucleares escapaban de la capacidad de observación de los filósofos que habitaban el mundo antiguo. Hay constancia del concepto de electricidad en peces eléctricos desde el siglo XXVIII a.C., en el Antiguo Egipto, y se sabe de escritos sobre magnetismo desde el filósofo Tales de Mileto en el siglo VI a.C., con piedras procedentes de la ciudad de Magnesia que atraían el hierro. Se dice que este filósofo, además, observó los fenómenos de atracción y repulsión que podían producirse en el ámbar mediante fricción y formuló la idea de que el rozamiento de este material imbuía el objeto con la misma alma que podía observarse en la magnetita. No obstante, esta idea, *correcta* en su interpretación unificadora, pero *incorrecta* en su explicación de los fenómenos, no fue de gran relevancia, pues la electricidad no se desarrolló más allá de la curiosidad de la triboelectricidad y el magnetismo se centró casi exclusivamente en la creación de brújulas, y fue descartada cuando magnetismo y electricidad empezaron a estudiarse en el mundo moderno. Esta diferenciación fue realizada por el filósofo natural William Gilbert a las puertas del siglo XVII en su obra *De Magnete*, donde, al tiempo que introducía la separación que marcaría el desarrollo de estos dos fenómenos en el siglo siguiente, acuñó el término de *electricus* desde la palabra *ἤλεκτρον*, ámbar en griego.

La difusión del método científico entre la intelectualidad europea a lo largo de los siglos XVII y XVIII llevó a un estudio pormenorizado de los fenómenos presentes en el universo con la intención de encontrar leyes que pudiesen explicar la verdadera naturaleza de los objetos e interacciones. Es, con esta nueva forma de abordar la obtención de conocimiento, con la que tanto el magnetismo como la electricidad comenzaron a estudiarse meticulosamente, sobre todo en el caso de la segunda, y con la que se empezaron a desarrollar teorías formales para dar explicación a los fenómenos experimentales que se presentaban, mediante el

uso de instrumentos matemáticos. A rebufo de la revolucionaria teoría de la gravedad formulada por Newton en el siglo XVII, la electrostática consiguió desarrollarse de forma considerable a lo largo del siglo XVIII de la mano de científicos como Von Kleist, Van Musschenbroek, Coulomb o Cavendish (quien, además, determinó experimentalmente la constante de gravitación universal), encontrando una expresión para la interacción de las cargas conocida como ley de Coulomb, con una estructura calcada a la formulada por Newton en el siglo anterior para las masas,

$$\vec{F} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r}_{12}, \quad (1)$$

siendo  $r$  la distancia entre cargas y  $\hat{r}_{12}$  el vector unitario esa dirección.

No obstante, para alcanzar una unión conceptual entre magnetismo y electricidad, tuvo que confluír una tercera disciplina que venía desarrollándose de forma paralela durante la Ilustración: la química. Hoy sabemos, gracias a los desarrollos científicos sobre los que versa este trabajo, que no son las cargas eléctricas *per se* las que generan un campo magnético, sino que es el movimiento de estas el responsable de tal efecto. Por lo tanto, la primera invención que abrió la puerta al estudio que concluyó en una unión de conceptos fue la pila voltaica, un generador de cargas que podían ser conducidas a través de un hilo conductor.

## 1.2 La pila voltaica

Hasta finales del siglo XVIII, las corrientes eléctricas no fueron abordadas de forma intensiva, pudiendo destacar únicamente los estudios sobre la electricidad en las nubes e invención del pararrayos por parte de Benjamin Franklin a mediados de ese siglo. Este vacío terminó, no obstante, cuando durante la década de 1780, el fisiólogo italiano Luigi Galvani descubrió contracciones musculares en la pata de una rana que estaba diseccionando al unir el bisturí con un enganche de cobre que el científico utilizaba para sujetar la muestra. Galvani hipotetizó que esta reacción del músculo del animal se debía a una *electricidad animal* que estaba almacenada en los tejidos biológicos, explicación que no convenció a un compañero de su Universidad, Alessandro Volta, químico descubridor del metano, el cual buscó una forma de encontrar el



fenómeno observado por Galvani sin hacer uso de materiales de origen animal. Con este propósito, Volta comenzó a experimentar con diferentes metales a partir de 1794, llevándole a desarrollar la pila que mostraría a la *Royal Society* 6 años después. Esta pila, nombrada voltaica en su honor, consistía en pares de discos metálicos de dos materiales, originalmente cobre y zinc, y más tarde plata y zinc, apilados en una columna con un cartón o un trozo de tela o cuero empapado en salmuera u otro electrolito entre cada par. Además, se podía crear una pila de mayor fuerza electromotriz mediante la conexión de otras columnas de discos dispuestos de forma opuesta.

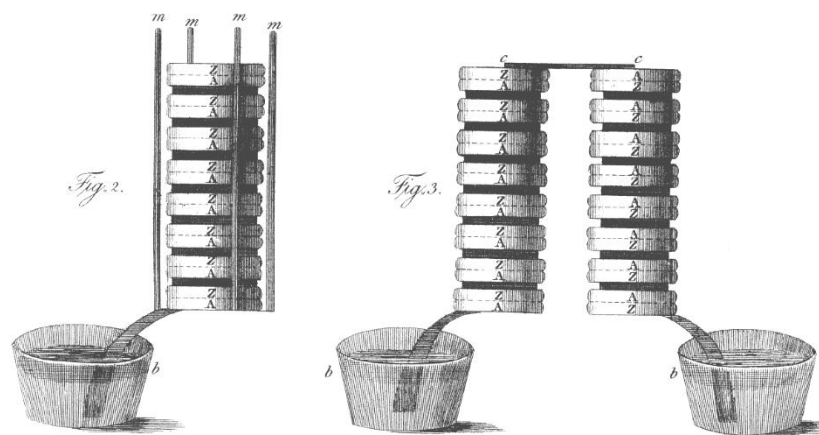


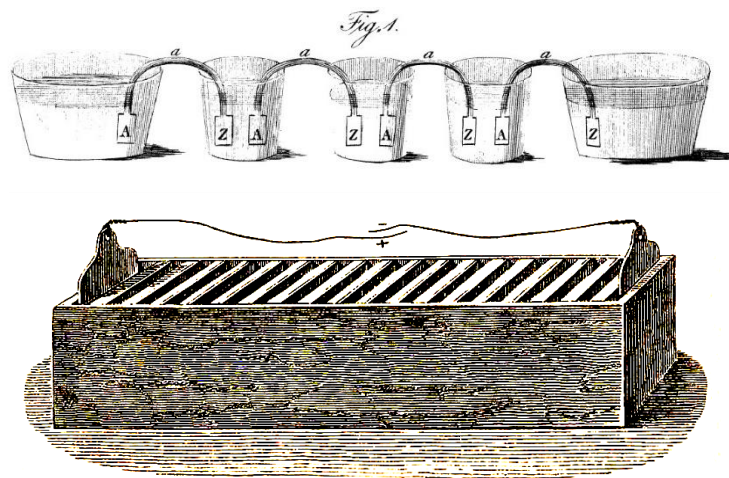
fig 1. Ilustración de la pila voltaica presentada por Volta en 1800.

Con este aparato, Volta pudo comprobar cómo los polos exhibían las propiedades observadas para los experimentos electrostáticos mientras estos no estaban conectados entre sí. Cuando sí se daba esta situación, conectándolos mediante un hilo metálico, no se podía detectar carga eléctrica en los extremos de la pila, pero se podía observar el efecto en la musculatura animal que el científico italiano buscaba para desmentir el concepto de *electricidad animal* que fundamentaba la teoría del galvanismo. La electricidad no estaba contenida en los tejidos de los animales, como Galvani había supuesto, sino que era producida por una reacción de uno de los metales y el líquido salino, denominado electrolito. Concretamente, el proceso por el cual podemos observar este fenómeno puede ser descrito mediante una reacción reducción-oxidación (Red-Ox):



Cuando los terminales de la pila están conectados, el Zn se oxida, liberando dos electrones que, al unirse con iones  $H^+$  libres en la superficie del Cu o Ag, dan lugar al gas hidrógeno, dejando un desequilibrio eléctrico en el zinc que debe ser cubierto con electrones procedentes del cátodo.

Aunque el dispositivo desarrollado por el científico italiano mostraba un gran potencial para el desarrollo científico, hubo que modificar el invento original, pues presentaba serios problemas de durabilidad y renovación debido a la disposición vertical de los discos, que apretaban los trozos con electrolito y este se derramaba. Para evitar esto, Volta diseñó otra manera de distribuir los metales y el electrolito, la conocida como pila de coronas, pero fue eclipsada por la solución que desarrolló el químico William Cruickshank, que consistía en un calco de la pila original dispuesta de manera horizontal, con un recipiente de madera dividido, mediante paredes de Zn y Cu, en franjas vacías en las que se introducía el electrolito (salmuera o ácido).



*fig 2. Arriba pila de coronas (Volta), abajo pila de artesa (Cruickshank).*

Aunque más tarde se desarrollarían otras formas de generar electricidad mediante reacciones químicas, como la celda galvánica, fue la pila de artesa la que permitió el estudio de corrientes de forma controlada en el laboratorio durante las primeras décadas del siglo XIX.

### **1.3 Los restos de la Ilustración en la Europa decimonónica**

Como consecuencia del desarrollo científico y filosófico que presencié Europa durante el Siglo de las Luces, tres polos intelectuales consiguieron establecerse

como círculos de gran influencia a finales del siglo XVIII, ligados, cada uno, a una forma particular de entender la Naturaleza: el empirismo británico, el racionalismo francés y el idealismo alemán, con la *Natürphilosophie* como bandera<sup>18</sup>. Esta situación tuvo relevancia también en el caso del desarrollo científico ligado a la invención de la pila voltaica, y fue en la *Royal Society* londinense y la *Académie des sciences* parisina donde más se avanzó en los fenómenos asociados a este nuevo invento. Respecto al caso alemán, la forma en la que se entendía el desarrollo científico y la investigación en torno a los fenómenos de la Naturaleza despertaba recelos entre los investigadores franceses y británicos, pues presentaba una inclinación a buscar conexiones más allá de la percepción y el raciocinio que tanto ensalzaban sendas instituciones.

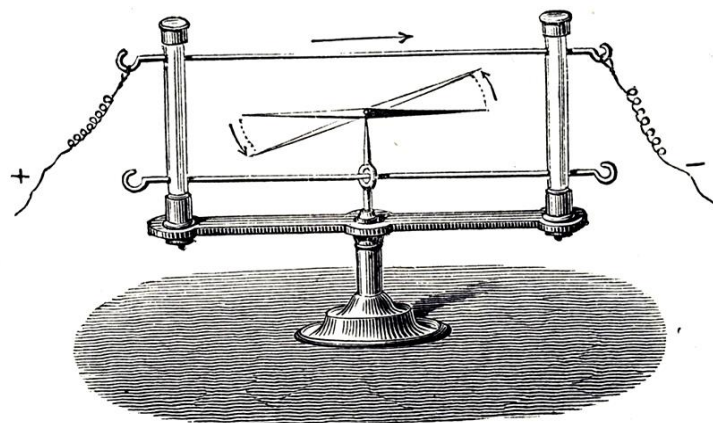
La academia británica fue la primera en recibir noticias de la invención de la pila, directamente de mano de su inventor, y aquellas personas que tuvieron constancia del dispositivo comenzaron a trabajar en torno a los efectos que las corrientes tenían sobre el líquido, así como a buscar una explicación del funcionamiento de la pila mediante el desarrollo de la electroquímica. Por otro lado, desde el mundo francés, líder en el momento en cuestiones de electricidad, Biot se lanzó a desarrollar una teoría completamente formal, partiendo de los conceptos ya conocidos sobre electricidad, que pudiese explicar la electricidad generada, sin lograr obtener resultados satisfactorios debido a la limitada experimentación *especulativa* (esto es, experimentar a ciegas y ver qué pasa) que había en la academia francesa. Esta situación no fue, no obstante, obstáculo para el propio desarrollo de la pila, pues al ser un dispositivo fácil y barato de replicar, se propagó por Europa durante la segunda decena del siglo XIX de forma indiscriminada; los novísimos fenómenos que se podían observar en la pila, unidos a las posibilidades que abría la corriente eléctrica en campos como el de la medicina, promovieron que el artefacto desarrollado por Volta pudiese encontrarse en cualquier rincón del continente.

Este es el escenario en el que se encontraba Hans Christian Ørsted, filósofo natural danés, en 1820. Ørsted pertenecía al mundo germano, siendo educado en Filosofía Natural, sin hacer hincapié en el desarrollo de las matemáticas y

fundando su concepción del método científico en una especie de intuición, o visión trascendental (*Veranschaulichung*), y no en las matemáticas o la experimentación sin más, como se entendía en Francia y Reino Unido. No obstante, aunque el romanticismo alemán llegaba al punto de abordar la Naturaleza de manera puramente especulativa y pasional, Ørsted sí que aceptó a lo largo de su vida la importancia de la experimentación y las matemáticas, aunque las consideraba un complemento más para la Filosofía Natural y no la herramienta fundamental para poder comprender el mundo, pues esto solo podía hacerse de manera intuitiva, orgánica y “espiritual”. Esta concepción de la Naturaleza como algo interconectado de forma profunda, más allá de lo evidente, fue lo que empujó al científico danés a buscar una relación entre dos fenómenos que se entendían independientes: la electricidad y el magnetismo.

#### 1.4 El experimento de Ørsted: primer indicio del electro-magnetismo

Tras haber realizado observaciones de un extraño efecto entre una pila y una brújula, Ørsted publicó, en el año 1820, el descubrimiento de un fenómeno que escapaba de su comprensión: al colocar un arco galvánico (el cable que une los extremos de una pila cortocircuitada) sobre una aguja imantada, una brújula, se podía observar una desviación considerablemente alta de esta con respecto a la posición inicial.



*fig 3. Arco galvánico sobre aguja imantada (Ørsted).*

Tras un primer contacto con esta experiencia, y viendo que solo se presentaba con la aguja imantada y no con otros materiales con propiedades magnéticas (atraídos por imanes), Ørsted realizó una serie de variaciones en la

posición relativa de la aguja con respecto al conductor y en las características del propio arco galvánico y el entorno, las cuales quedan recogidas en la tabla 1.

Variación realizada	Cambio observado	Dependencia
Cable arriba/abajo, orientado N-S en el plano paralelo al de la aguja	Sentido de desviación	$\text{signo}(\Delta\alpha) \propto \text{Arriba/abajo}$
Cable arriba/abajo, orientado E-O en el plano paralelo al de la aguja	Sin cambio	-
Distancia	Ángulo de desviación	$\Delta\alpha \propto \frac{1}{r}$
Intensidad de la batería	Ángulo de desviación	$\Delta\alpha \propto I$
Aguja no magnética	Ausencia de desviación	-
Material del conductor	Sin cambio	-
Material entre cable y aguja	Sin cambio	-
Cable vertical, en el plano perpendicular al de la aguja	Ángulo de desviación	Orientación $\perp \vec{r}$
Ángulo del cable con el meridiano magnético en el plano paralelo a la aguja	Aumento de desviación	$\Delta\alpha \propto \Delta\alpha_{c-m}$

Tabla 1. Variaciones y observaciones realizadas por Ørsted.

Ørsted entendió que la interacción entre el cable y la aguja no tenía equivalente en las fuerzas conocidas en el momento, explicadas mediante la ley de gravitación universal y la ley de Coulomb, pues estas eran fuerzas radiales, cuyo efecto de atracción-repulsión se producía en la línea que unía ambos cuerpos interactuantes. En el caso que estaba tratando, la interacción parecía darse de forma circular alrededor del cable y Ørsted asumió que esta se producía de forma espiral en torno al mismo, siendo resultado de un *conflicto electro-magnético* que probaba una unión trascendental de ambos fenómenos. Ajeno a lo que el marco teórico de la época entendía, donde electricidad y galvanismo eran fenómenos separados, Ørsted intentó usar este experimento como confirmación de su teoría de conflictos de dos corrientes, en la que explicaba, además, el calor y la luz como resultado de este conflicto eléctrico. Esta teoría, no obstante, no era lo suficientemente demostrable, por lo que el concepto de *electromagnetismo* no se

asumió como correcto hasta observar una unión entre lo que se entendía como electricidad y galvanismo por parte de Arago en el año 1821. Suponiendo que la aguja se orienta en la dirección del campo magnético, podemos encontrar la explicación formal de este experimento de forma sencilla mediante la ley de Biot-Savart,

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} I \int \frac{d\vec{l}' \times \hat{r}}{r^2}, \quad (3)$$

donde  $r$  es el módulo de la distancia entre el cable y el punto en el que se quiere calcular el campo y  $\hat{r}$  es el vector unitario en esa dirección. Asumiendo un cable infinito, esta expresión nos arroja que

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{2\pi\rho} \hat{\phi}, \quad (4)$$

donde  $\hat{\phi}$  es el vector unitario del ángulo azimutal y  $\rho$  la coordenada radial en coordenadas cilíndricas en torno al cable, que se prolonga por el eje  $z$ . Esta expresión explica la dependencia del campo magnético alrededor del cable con la intensidad y la posición relativa del cable y la aguja.

La experiencia realizada por el científico danés, así como otras observaciones que no quedaron claras (como el uso de un cable en forma de U), fueron expuestas por Ørsted en una carta que mandó a todas las personas que se dedicaban a la experimentación en Europa, de forma que este fenómeno pudiese ser replicado por aquellos que tuviesen acceso a los escasos materiales necesarios. Esta carta, escrita en latín para poder ser comprendida en cualquier círculo científico de la época, fue publicada en un contexto en el que la pila voltaica, como hemos expuesto más arriba, estaba al alcance de una gran cantidad de personas, que ya estaban familiarizadas con su montaje, funcionamiento, características, etc., por lo que la noticia procedente de Copenhague pudo ser rápidamente comprobada y difundida por entre los círculos intelectuales de todos los rincones de Europa, siendo la *Académie des sciences* de París la institución que con mayor ahínco prosiguió el estudio de la relación electromagnética, con André-Marie Ampère a la cabeza.

Respecto al papel que jugó Ørsted en el desarrollo del electromagnetismo después de la publicación de esta carta, no se puede hablar más allá de un intento de mejorar el experimento mediante cambios en la pila y una búsqueda fallida de una forma de crear una brújula eléctrica mediante una pila móvil. No obstante, cabe destacar que, a pesar de ser considerado el padre del electromagnetismo, el filósofo natural tuvo que afrontar reclamaciones respecto a la originalidad del experimento, pues un jurista italiano, científico diletante, reivindicó que él había realizado y observado los fenómenos presentes en la carta enviada mucho antes que Ørsted. Este intelectual, Gian Domenico Romagnosi, había realizado una serie de observaciones con una aguja imantada y la, entonces novedosa, pila voltaica en 1802, llegando a publicar la experiencia en dos periódicos italianos sin que este fenómeno tuviese mayor impacto que una curiosidad más de las que se publicaban sobre la pila. Además, este experimento fue recogido en dos libros sobre galvanismo publicados en Francia en 1804, mencionando explícitamente la influencia de una corriente galvánica sobre una aguja imantada. No obstante, una lectura de la experiencia llevada a cabo por Romagnosi, que a primera vista consistió en la observación de la desviación de la aguja al acercarse a los bornes de la pila, no permite establecer de forma concluyente que su experiencia fuese la misma que la llevada a cabo en 1820, pues la descripción del mismo era superficial, el experimento parecía más relacionado con electrostática que con galvanismo y la conclusión no otorgaba un peso extraordinario a lo que había observado, elementos que sí que estaban presentes en el artículo de Ørsted. Aunque el científico danés reconoció la posibilidad de haber adelantado el desarrollo del electromagnetismo más de quince años, la falta de difusión y reconocimiento en los círculos científicos de la época justificaba la percepción de Ørsted como padre de la disciplina.

## **2. Primeros pasos del electromagnetismo: André-Marie Ampère**

### **2.1 El terremoto del electromagnetismo en Europa**

Al contrario de lo que se suele considerar, la revolución francesa no supuso un cambio drástico en el mundo científico posterior a la toma de la Bastilla. Aunque es cierto que los vaivenes de la época forzaron un cambio en las instituciones intelectuales y que una figura tan relevante como Antoine Lavoisier

fue ejecutada, la gran mayoría de los miembros de la academia de París original pasaron al *Institut national des sciences et des arts* creado por las autoridades revolucionarias en 1795. El motivo de la ejecución de Lavoisier no fue tanto una percepción de peligrosidad respecto a la ciencia por parte de los jacobinos, sino la asociación del científico con el sistema fiscal del antiguo régimen, pues había colaborado recaudando impuestos en la *Ferme générale*.

Este continuismo, unido al impulso que dio Napoleón al desarrollo científico, hicieron de la *Académie des sciences* de París la institución científica más importante del momento, lo cual justifica el rápido desarrollo del electromagnetismo por parte de esta institución tras la carta de Ørsted de 1820. La extensa difusión de la carta por parte Ørsted permitió la publicación de hasta cuatro traducciones al francés de manera casi simultánea durante el verano de ese año, así como el comienzo de las réplicas del experimento en la mayoría de los entornos científicos de la capital francesa. Por otro lado, en el mundo germánico, la carta fue recibida con interés y el experimento se replicó en múltiples ocasiones por toda Europa continental, de forma más atomizada que en el caso francés. Respecto a la reacción de la *Royal Society*, esta se encontraba en receso estival cuando Ørsted publicó su carta, por lo que el impacto inicial no fue tan relevante como en los entornos científicos continentales. No fue hasta el mes de noviembre que se dieron a conocer los resultados obtenidos por el científico danés dentro del círculo académico londinense, lanzando a Humphry Davy a la carrera por comprobarlos y obtener nuevas observaciones que, desafortunadamente para él, ya habían sido puestas de relieve por parte de Ampère en París. Davy presentó su informe una semana después y los resultados que había obtenido eran tan contundentes que la *Royal Society* otorgó la medalla Copley a Ørsted tan solo un día después de este acontecimiento. En definitiva, en cuestión de pocos meses, el experimento se había replicado y estudiado por científicos de toda Europa, al menos en Estocolmo, Glasgow, Londres, Roma, Génova, París, Berlín, Florencia, Kiel, Halle, Gotinga, Fráncfort, Múnich, Heidelberg, Karlsruhe, Viena, Pavía y Milán. Casi de la noche a la mañana, el mundo científico había comenzado a girar en torno a la singular naturaleza que presentaba la interacción entre el arco galvánico y la aguja imantada.



Debido a la estrategia utilizada por Ørsted para publicar su descubrimiento, difundiéndolo de manera extensiva para que pudiese ser replicado y observado en todos los entornos científicos de Europa, la carrera por obtener mayor conocimiento del fenómeno produjo descubrimientos simultáneos en diferentes entornos científicos, pues estos no podían estar en contacto entre sí debido a las limitaciones de la comunicación que presentaba esa época. Así pues, por ejemplo, en el mundo germánico se desarrollaron cambios en los requerimientos de la pila necesaria para observar el fenómeno que ya habían sido propuestos por Ørsted en un segundo artículo de menor difusión<sup>7</sup>, y Humphry Davy presentó en la *Royal Society* algunos descubrimientos que él mismo asumía, acertadamente, que debían haber sido observados y estudiados en algún otro lugar de Europa, pues hacía más de un mes que la carta se había publicado<sup>19</sup>. No es de extrañar, por lo tanto, la cantidad de trabajo que llevó a cabo Ampère durante los últimos 4 meses del año 1820, llegando a publicar hasta nueve memorias (algunas con dos partes) antes de entrar en el año 1821<sup>1</sup>.

## **2.2 “Hechos generales”: los experimentos exploratorios de Ampère**

De forma poco común para un académico en la época, Ampère se relacionaba, además de en entornos puramente científicos, en círculos y asociaciones dedicadas a la discusión y estudio de disciplinas como la epistemología y la psicología, más alejadas del matematicismo imperante en la capital francesa. Ampère era un científico que no encajaba bien dentro de la ortodoxia laplaciana del momento y recibir noticias de una interacción que no parecía poder ser explicada mediante fuerzas centrales fue determinante para que el científico se embarcase en estudiar el reciente fenómeno con el ímpetu que demostró. Tras la demostración de Arago en la academia y a pesar de su falta de experiencia en el campo de la experimentación, Ampère replicó el experimento de Ørsted con la finalidad de entender de forma profunda lo que ocurría, para más tarde ser capaz de establecer leyes que pudiesen explicar el comportamiento de los imanes en presencia de corrientes eléctricas. Gracias a la ausencia, debida a vacaciones, del mayor especialista en teoría eléctrica del momento, el laplaciano

---

<sup>1</sup> Para una recopilación de los primeros trabajos realizados por Ampère, véase la Tabla 2.1 del libro *Exploratory Experiments*<sup>1</sup>.

Jean Baptiste Biot, Ampère tomó la delantera en los estudios sobre electromagnetismo y pudo establecer unas primeras impresiones para la academia sin tener que confrontarlas al alto rigor que muy probablemente Biot le habría exigido<sup>12</sup>.

El trabajo de Ampère puede ser dividido en dos etapas: la primera se corresponde con las primeras tres semanas de investigación desde que tiene constancia del experimento de Ørsted, consistentes en una búsqueda de “hechos generales”<sup>11</sup>, observaciones puntuales que pudiesen servir de base para la fundación de una teoría formal o la construcción de aparatos más complejos; la segunda, que abarca los cuatro meses siguientes, contempla los dispositivos que desarrolló Ampère tras haber llegado a un número considerable de “hechos generales” observados, por lo que comenzó a centrarse en diseñar aparatos que pudiesen proporcionarle mediciones que le permitiesen alcanzar un formalismo matemático<sup>10</sup>. Así pues, los primeros experimentos realizados por el francés fueron el producto de un proceso de prueba-error con el que poco a poco fue vislumbrando los parámetros involucrados en la interacción de corrientes e imanes.

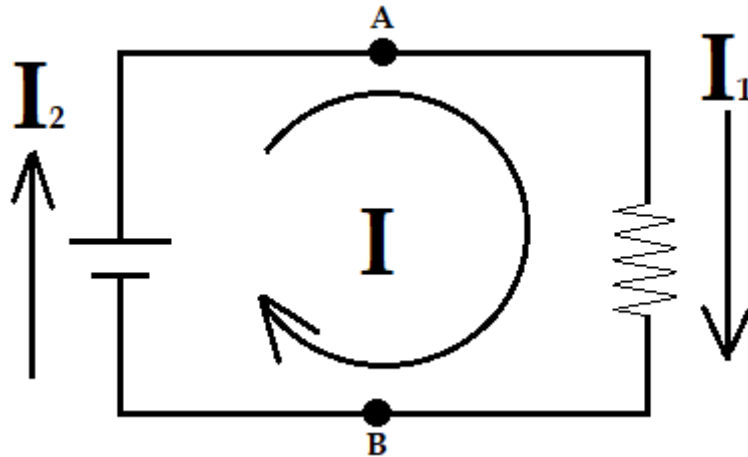
### ***2.2.1 Aguja astática***

Como es evidente, el primer experimento que llevó a cabo Ampère fue el experimento original de Ørsted, aquel que pudo observar en la *Académie des sciences* de la mano de Arago. Como hemos dicho, en los primeros pasos que dio, Ampère fue explorando las posibilidades que presentaba la interacción electromagnética, reproduciendo las variaciones que hizo Ørsted y observando otras nuevas en el proceso. Una de las cosas que primero llamaron la atención del científico fue el hecho de que no solamente el cable presentaba fenómenos electromagnéticos, sino que, al acercar la aguja a la pila, podía realizar las mismas comprobaciones observando un comportamiento opuesto al que tenía con el arco galvánico, lo cual fue achacado a la existencia de una corriente en el interior de la batería de igual magnitud y diferente sentido a aquella que circulaba por el cable. Esta observación es fácilmente explicable mediante la

primera ley de Kirchhoff, que impone que la suma de todas las corrientes que entran a un nudo es nula,

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0. \quad (5)$$

Según podemos ver en la figura 4, si asumimos dos nudos en los puntos *A* y *B* del circuito, veremos que la corriente que entra a cada uno debe ser igual a la que sale y, puesto que estamos tratando con una malla cerrada, podremos concluir que estaremos tratando con corrientes de igual magnitud, pero diferente sentido. La introducción del concepto “corriente circulando por un circuito cerrado” fue fundamental para establecer un sistema de referencia que aglutinase las corrientes opuestas que observaba.



*fig 4. Esquema del arco galvánico.*

Más allá de esta observación que complementaba lo conocido por Ørsted, Ampère buscó una forma de mejorar el experimento de este mediante la eliminación de la influencia del campo magnético terrestre sobre la aguja imantada, de forma que cualquier posible influencia externa que distorsionase el efecto electromagnético pudiese ser neutralizada. Para esto, el académico francés diseñó, junto al constructor de instrumentos Nicolas Constant Pixii, lo que sería conocido como aguja astática, que consistía en un soporte regulable para una brújula, de forma que esta pudiese situarse en el plano perpendicular a la dirección del campo magnético terrestre y solo estuviese involucrado el campo magnético generado alrededor del cable.

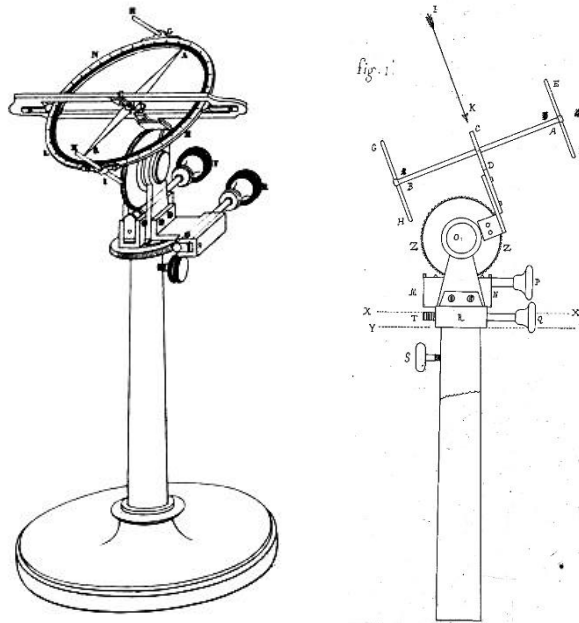


fig 5. Aguja astática (izquierda) y vista de perfil (derecha).

Como primera observación al realizar el experimento con esta aguja, Ampère hizo notar que, colocando el cable sobre el centro de la aguja, esta tendía a formar un ángulo recto independientemente de la intensidad de la batería, lo cual contrariaba una de las observaciones publicadas en el texto original<sup>10</sup>. Esto se explica mediante el hecho de que la orientación de la aguja viene dada por la superposición de las componentes de campo magnético presentes en el experimento,

$$\vec{B} = \vec{B}_{||} + \vec{B}_{\perp}. \quad (6)$$

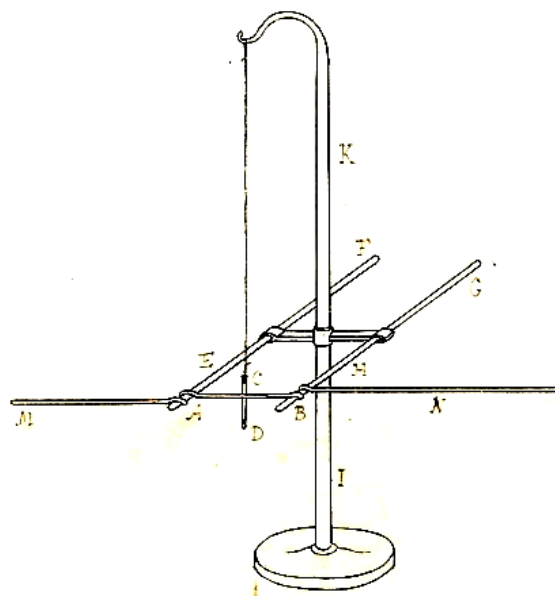
Ørsted había observado una desviación que dependía de la intensidad debido a que la componente que generaba el cable, perpendicular al mismo, tenía que actuar junto a la omnipresente componente terrestre. Al colocar la aguja en el plano perpendicular al meridiano magnético, Ampère había conseguido tener una sola componente para el campo magnético, de forma que la aguja acababa orientándose con un ángulo de 90°.

### **2.2.2 Aparato para el efecto atracción-repulsión**

El primer “hecho general” que formuló Ampère fue el de la alineación de un imán con el campo producido por una intensidad alrededor del cable por el que esta corriente circulaba, lo cual había observado claramente tras la mejora del

experimento de Ørsted con la aguja astática. Acto seguido, Ampère comenzó a explorar las diferentes posibilidades que este efecto podría tener, buscando mediante prueba y error nuevos efectos de la corriente sobre el imán, no tomándole mucho tiempo el descubrir los fenómenos de atracción o repulsión que se podían dar entre esos dos elementos. Cabe notar que, a pesar del correcto avance del científico en el reciente campo del electromagnetismo, el camino que seguía Ampère para llegar a nuevos descubrimientos era guiado, en mayor medida, por una intuición fundada en la interiorización de los fenómenos que, tras muchas pruebas sin objetivo claro, había conseguido observar.

Con la finalidad de poder comprobar esta hipótesis de atracción/repulsión, que se había mostrado de manera más o menos clara para Ampère, el científico diseñó un experimento que pudiese mostrar este fenómeno de forma contundente. Para ello, colocó un imán alargado pendiente de un hilo de forma vertical e igualó su centro a la altura de un cable tendido horizontalmente, por el que pasaría una corriente cuya polaridad e intensidad podría variar libremente. Esta configuración demostró lo que Ampère había sospechado, pues observó una atracción o repulsión al conectar la corriente de una u otra manera y pudo formular un nuevo “hecho general”.



*fig 6. Aparato para el efecto atracción-repulsión.*

El comportamiento observado por Ampère puede ser explicado teniendo en cuenta la expresión de la fuerza que ejerce un campo magnético externo sobre un cable por el que circula corriente. Aunque en el experimento es el imán el que se mueve, sabemos que la fuerza que ejerza el imán sobre la corriente será igual y de sentido contrario a la que ejerza la corriente sobre el imán. Así pues, asumiendo un campo magnético constante en todo  $L$ ,  $\vec{B} = \mu\vec{H} = cte\hat{z}$  y  $\vec{I} = I\hat{y}$ ,

$$\vec{F}_{imán \rightarrow cable} = \int (\vec{v} \times \vec{B}_{ext})dq = \int (\vec{I} \times \vec{B}_{ext})dl = \int IB\hat{x} dl \quad (7)$$

$$\vec{F}_{c \rightarrow i} = -\vec{F}_{i \rightarrow c} = -IBL\hat{x}, \quad (8)$$

tenemos una expresión que nos muestra una dependencia con la orientación del imán y el valor de la intensidad, tal y como observó Ampère. Como forma de comprobar la reciprocidad del efecto, Ampère dejó escrita la posibilidad de realizar el montaje anterior fijando el imán y dejando el cable colgando de dos hilos, aunque no se tiene constancia de que acabase realizándolo.

### **2.2.3 Hélice galvánica (fija y móvil)**

Tras una primera exposición por parte de Ampère de resultados en la academia, el círculo parisino pudo ver quién parecía tomar la delantera en el desarrollo de los novedosos fenómenos electromagnéticos. Ampère había mejorado considerablemente las observaciones de Ørsted, había reproducido sus experimentos con éxito y había descubierto un nuevo efecto involucrando corrientes e imanes, lo que sin lugar a duda abrió las puertas de forma definitiva al campo del electromagnetismo. Tras la formulación de los dos primeros “hechos generales”, Ampère estaba listo para adentrarse en implicaciones más profundas a nivel fundamental, empezando por el desarrollo de la idea de que el origen del magnetismo terrestre debía estar ocasionado por la presencia de corrientes galvánicas en el interior de la Tierra. Yendo incluso más lejos, el académico comenzó a plantearse la hipótesis de que los cuerpos magnéticos debiesen sus características propiedades a una presencia de corrientes microscópicas en el interior del material.

Tomando esa idea del origen magnético como superposición de corrientes galvánicas, Ampère buscó la construcción de un experimento que involucrase

exclusivamente corrientes, pero que llegase a presentar un comportamiento plenamente semejante al que tendría un imán. Utilizando cables enrollados de forma cilíndrica, que denominó “hélices” (hoy llamados solenoides), Ampère buscó obtener, mediante la superposición de círculos por los que pasaba corriente, un equivalente galvánico para un imán y una aguja imantada

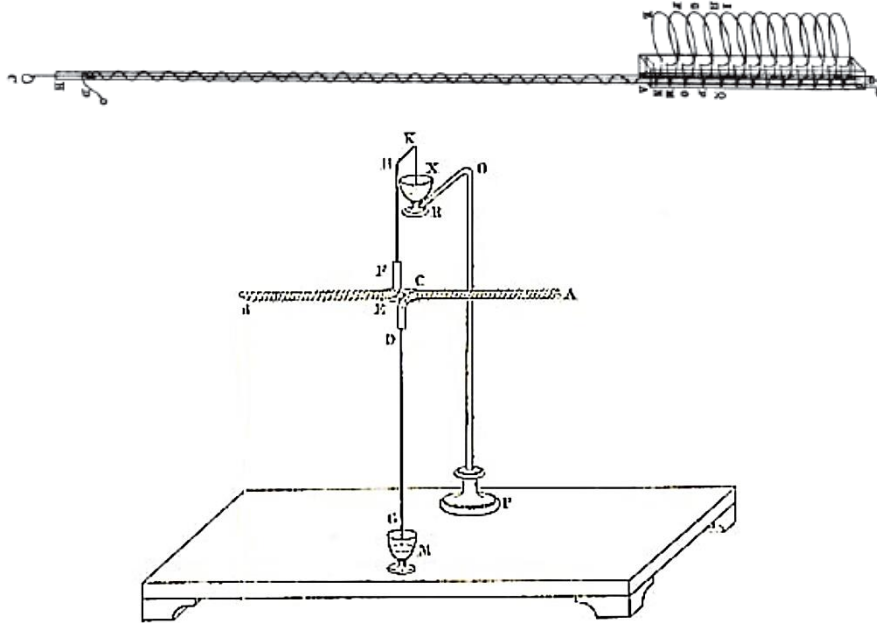


fig 7. Hélice galvánica fija (arriba) y móvil (abajo).

Respecto al montaje de la hélice fija, no hay nada que resaltar más allá de tratarse de un solenoide. Por otro lado, la hélice galvánica móvil consistía en unas varillas de vidrio rodeadas por un cable y mantenidas en suspensión por el mismo, de forma que se tenía un “imán galvánico” en el aire que podía orientarse con el campo magnético terrestre. A pesar de que no pudo mostrar los fenómenos con la misma claridad que en los experimentos anteriores, con el perfeccionamiento en la construcción del aparato pudo comprobar la similitud con la aguja magnética. El fundamento para este experimento se puede encontrar en las características magnéticas que presenta un solenoide, derivables mediante la ley de Ampère,

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_{enc}, \quad (9)$$

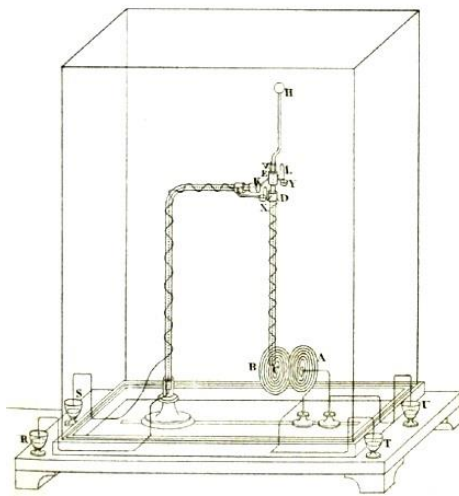
la cual nos da un campo nulo en el exterior y

$$\vec{B} = \mu_0 n I \hat{y} \quad (10)$$

en el interior del mismo, donde  $n = \frac{N}{L}$  es la densidad de espiras del solenoide.

#### **2.2.4 Dispositivo para el efecto de atracción-repulsión de corrientes**

Después de haber experimentado con las interacciones que presentaban imanes (o la tierra) y corrientes, Ampère consideró oportuno igualar los efectos galvánicos a aquellos presentes en los imanes, suponiendo que, al igual que estos dos elementos se atraían o repelían entre sí, dos corrientes deberían presentar semejantes interacciones.



*fig 8. Dispositivo para el efecto de atracción-repulsión de corrientes.*

Para hacer de esta nueva hipótesis un “hecho general”, fabricó un dispositivo en el que dos espirales de conductor, por las que pasa una corriente de la misma magnitud y sentido igual o contrario, serían enfrentadas para observar su interacción mutua. Una de las espirales se mantendría fija, mientras que la otra estaría unida a un brazo articulado que limitase la libertad de movimiento de esta a ser atraída o repelida. La singularidad de este experimento, que involucraba dos corrientes al mismo tiempo, dificultó la observación del fenómeno en los primeros intentos realizados por Ampère debido a que la pila que usaba no era lo suficientemente potente como para poder generar ambas corrientes con la suficiente intensidad como para poder poner de manifiesto la interacción entre espirales. No obstante, tras la adquisición de la batería más potente disponible en París, Ampère pudo observar, y presentar a la academia, este fenómeno, que prescindía por completo de la intervención de materiales magnéticos.



A diferencia de los anteriores experimentos, la explicación formal que se puede dar de este fenómeno necesita una simplificación que, aunque no es del todo cierta, permitirá obtener una impresión cualitativa de la interacción. Así pues, si asumimos que las espirales pueden ser modeladas como dipolos magnéticos, el momento dipolar total de cada espiral será la suma de los momentos dipolares de cada espira que la conforma,

$$\vec{m} = I\vec{A} = I\pi r'^2 \hat{n}, \quad (11)$$

donde  $\hat{n}$  es el vector unitario perpendicular a la superficie de la espira. Si  $n$  es la densidad de espiras por unidad de longitud y  $R$  el radio de la espiral, el momento total será

$$\vec{m}_T = \int_0^R I\pi r'^2 n dr' \hat{n} = \frac{n\pi}{3} IR^3 \hat{n}. \quad (12)$$

Sabiendo la expresión para el campo magnético generado por un dipolo y la fuerza que sufre un dipolo en un campo magnético<sup>5</sup>,

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{1}{r^3} (3(\vec{m} \cdot \hat{r})\hat{r} - \vec{m}) \quad (13)$$

$$\vec{F} = \nabla(\vec{m} \cdot \vec{B}), \quad (14)$$

obtendremos que la fuerza que ejerce un dipolo sobre otro vendrá dada por<sup>20</sup>

$$\vec{F} = \frac{3\mu_0}{4\pi r^4} \left( (\hat{r} \times \vec{m}_a) \times \vec{m}_b + (\hat{r} \times \vec{m}_b) \times \vec{m}_a - 2\hat{r}(\vec{m}_a \cdot \vec{m}_b) + 5\hat{r}((\hat{r} \times \vec{m}_a) \cdot (\hat{r} \times \vec{m}_b)) \right), \quad (15)$$

donde  $r$  es la distancia entre los dipolos y  $\hat{r}$  el vector unitario en esa dirección.

Sabiendo que el módulo de ambos momentos dipolares es igual, pues circula la misma intensidad por ambas espirales, y que las espiras están dispuestas de forma paralela a la misma altura, podemos simplificar la ecuación viendo que el momento dipolar de ambas se encontrará en la misma línea, aquella que une ambos dipolos, de forma que la fuerza será

$$\vec{F} = \frac{3\mu_0}{2\pi} \frac{m_T^2}{r^4} \hat{r} = \pm \frac{\mu_0 n^2 \pi R^6 I^2}{6} \frac{1}{r^4} \hat{r}, \quad (16)$$

donde el signo dependerá de la dirección de la intensidad en ambas espiras.

## 2.3 Refinamiento y cuantificación: el albor de una nueva teoría

Los experimentos realizados por Ampère durante septiembre de 1820, como hemos dicho anteriormente, tenían una intencionalidad exploratoria, pues los fenómenos que involucraban electricidad y magnetismo habían surgido de forma incidental, sin más conocimiento al respecto que el experimento de Ørsted. Gracias a este desarrollo de los “hechos generales”, unido a las observaciones realizadas sobre dos cables rectilíneos de gran longitud por los que circulaba corriente, Ampère pudo redactar ciertas leyes en términos fenomenológicos recogidas en las *Conclusiones* contenidas en la memoria que presentó a la academia (ver Anexo I).

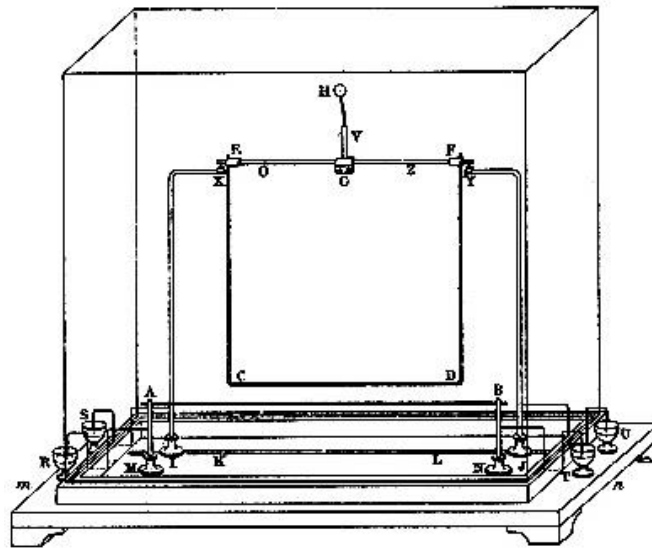
Por otro lado, el experimento para el efecto de atracción-repulsión de dos corrientes había supuesto un ligero cambio en la metodología utilizada para su desarrollo, pues Ampère no estaba tanto *descubriendo* qué efecto tendría una corriente sobre otra, sino que esperaba *demostrar* una hipótesis a la que había llegado de forma autónoma tras las experiencias que ya había realizado. Además, debido a la presión que los desarrollos formales de otros científicos, sobre todo Biot y Savart, ejercían sobre Ampère, este tuvo que dejar de lado el enfoque de búsqueda de “hechos generales” y tuvo que centrar sus esfuerzos en desarrollar experimentos que permitiesen cuantificar y observar de forma más precisa los fenómenos que presentaba la interacción electromagnética, gracias, en gran medida, al constructor de instrumentos N.C. Pixii.

### 2.3.1 Balanza de corrientes

La idea más novedosa que introdujo Ampère dentro de las *Conclusiones* fue el hecho de que dos corrientes eléctricas interaccionaban sin necesidad de involucrar imanes de la misma forma que con estos cuerpos magnéticos. A pesar de que el dispositivo para la atracción-repulsión de corrientes (2.2.4) solo presentaba fenómenos debidos a una intensidad, la posibilidad de haber creado un imán eléctrico mediante la espiral empujó a Ampère al desarrollo de un dispositivo que involucrase exclusivamente cables rectilíneos.

A pesar de que la interacción entre dos cables rectilíneos era demasiado débil para los medios de la época, Ampère fue capaz construir, tras varios

intentos, un dispositivo que pudiese mostrar este efecto, la denominada balanza de corrientes. Este aparato, encerrado en una campana de cristal para evitar perturbaciones no deseadas, consistía en un cable fijado a la base y otro, de forma rectangular, que pudiese desplazarse de forma vertical y cuyo segmento inferior interactuaba con el cable fijo. Ampère pudo comprobar cómo las corrientes paralelas ejercían una fuerza atractiva entre sí, mientras que las antiparalelas se repelían.



*fig 9. Balanza de corrientes.*

Al tratarse este experimento de una corriente sobre la que actúa un campo magnético (originado por la otra corriente), podemos encontrar el campo de un conductor con la Ec.4 y la fuerza ejercida con las Ec.7&8:

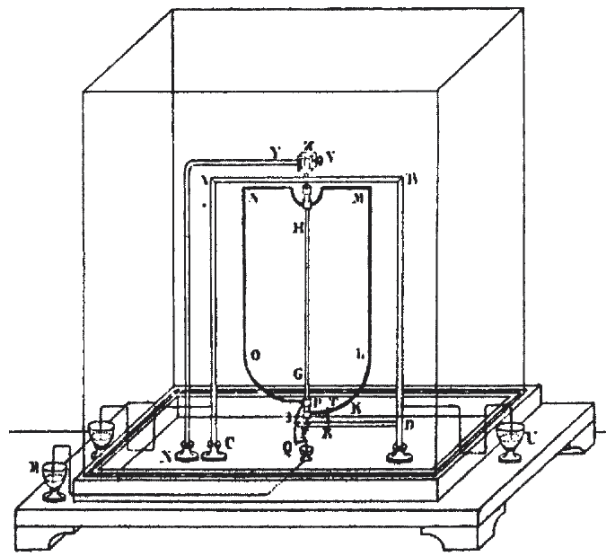
$$\vec{F}_{1 \rightarrow 2} = I_2 L B_1 \hat{r} = \frac{\mu_0 I_1 I_2 L}{2\pi r} \hat{r}, \quad (17)$$

donde el signo vendrá dado por la dirección relativa de las corrientes y siendo  $r$  la distancia entre los cables y  $\hat{r}$  el vector unitario en esa dirección.

### **2.3.2 Dispositivo para la alineación de corrientes**

La segunda hipótesis a la que llegó Ampère sobre la interacción mutua de corrientes fue la tendencia que estas deberían tener a alinearse de forma paralela, pudiendo producir un giro en los cables para llegar a este estado. Para observar tal efecto, como vino siendo habitual, construyó un sistema con dos cables por los que circulaba corriente, uno de ellos fijo y el otro móvil, en este caso

en torno a un eje vertical, de forma que podría girar para buscar una alineación paralela con el cable inmóvil.



*fig 10. Dispositivo para la alineación de corrientes.*

A pesar del buen planteamiento de este experimento y el éxito que tuvo su demostración a la academia, lo cierto es que Ampère no tuvo en cuenta los efectos que tenían los cables verticales, tanto móviles como fijos, entre sí, de forma que el efecto observado se debía, en gran parte, a la atracción o repulsión de estos segmentos. No obstante, lo que Ampère asumía que estaba ocurriendo no era del todo incorrecto, pues el cable fijo estaba generando un campo magnético sobre el cable móvil, que producía una fuerza en dirección a la línea que los unía, que no realizaba ningún trabajo debido a la limitación de movilidad del aparato. Sin embargo, esta fuerza sí que producía un momento de las fuerzas en los segmentos del cable móvil, pues

$$\vec{\tau} = \vec{r} \times \vec{F}, \quad (18)$$

lo que hacía girar el mismo hasta alcanzar el estado paralelo. Debido a la complejidad que tendría estudiar la forma exacta de este momento de las fuerzas (el campo magnético no es constante, las corrientes están desplazadas verticalmente la una de la otra, etc.), no daremos una expresión matemática para esta compleja interacción, pues escapa de los objetivos de este trabajo, aunque en la figura 11 hemos adjuntado dos esquemas que permitan entender el que debería haber sido el único fenómeno involucrado en el experimento.

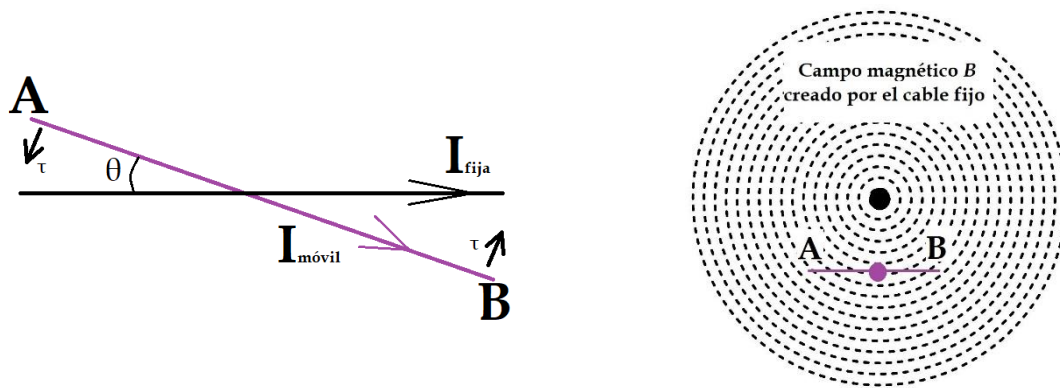


fig 11. Esquema para alineación de corrientes. Vista de planta (izq.) y perfil (dcha).

### 2.3.3 Dispositivo para la medición de la dependencia angular

El perfeccionamiento de los instrumentos desarrollados por Ampère, aun siendo admirado por el entorno científico de París, no satisfacía por completo las demandas que estos círculos imponían, pues ninguno de los aparatos presentados por Ampère arrojaba luz sobre los fundamentos formales detrás de cada efecto. En oposición a Biot, que había estado estudiando las posibilidades teóricas para el electromagnetismo desde su regreso a París, Ampère quería desarrollar el cuerpo teórico de esta nueva disciplina mediante ajustes matemáticos basados en datos tomados de forma experimental. Esto se conseguiría mediante una máquina de alta precisión que permitiese variar los diferentes parámetros que pudiesen formar parte de la interacción entre corrientes, que según Ampère debía ser de la forma

$$F = \frac{I_1 I_2 \cos \gamma \sin \alpha \sin \beta}{r^2}, \quad (19)$$

donde los ángulos pueden ser observados en la figura 12.

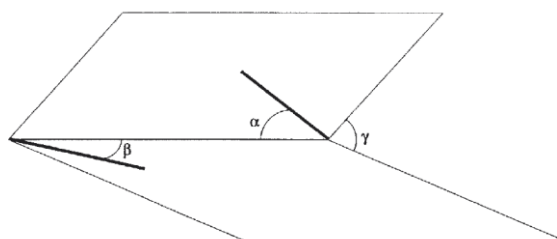
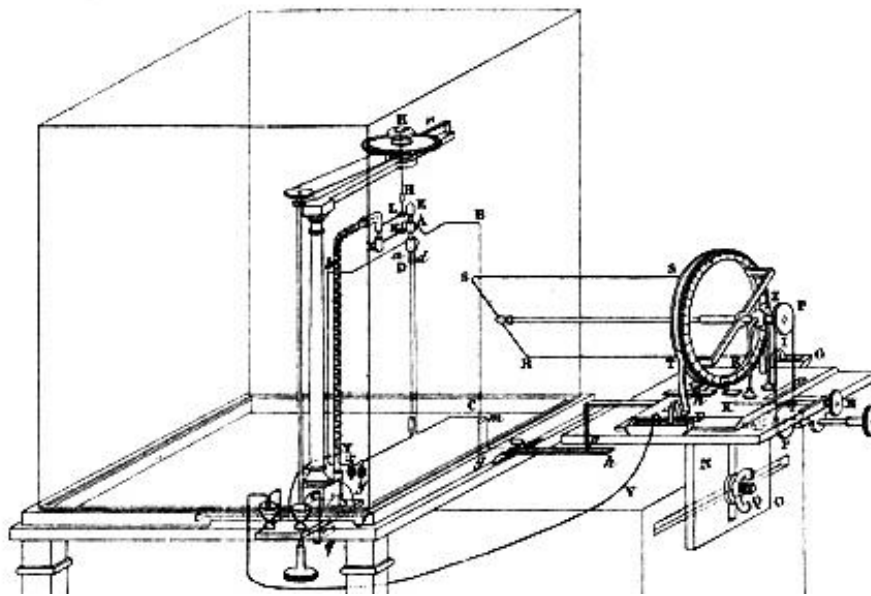


fig 12. Esquema de ángulos para dos segmentos de corriente en planos no paralelos.

Esta fórmula, altamente influenciada por los conocimientos de mecánica clásica debidos a su posición como docente, fue propuesta por Ampère por

inferencia de que esta fuerza debía asemejarse a aquellas ya formuladas, a saber, la gravedad y la electrostática. A pesar de su concepción antilaplaciana de la física, Ampère necesitó utilizar las estructuras de esta teoría para dar explicación a los efectos producidos por corrientes, llegando a desarrollar el análogo de la balanza de Coulomb, experimento fundamental de la electrostática, para corrientes eléctricas.

El dispositivo para la medición de la dependencia angular fue desarrollado por Ampère y Pixii con intención de proporcionar una manera precisa y, sobre todo, cuantificable de estudiar la interacción entre corrientes. Este dispositivo consta de dos elementos separados: una balanza de torsión a la que está unida un cable vertical, y un cable fijo cuyo ángulo de desviación respecto al cable vertical y distancia podía ser variado.



*fig 13. Dispositivo para la medición de la dependencia angular.*

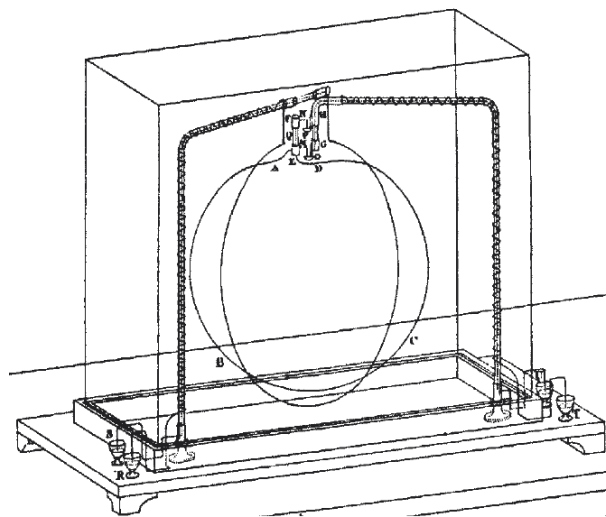
Ampère tenía intención de tomar medidas de la fuerza ejercida por el cable fijo sobre el que se encontraba en la balanza para diferentes ángulos, con variaciones lo más pequeñas posibles, pero no contó con las limitaciones que presentaban las baterías de la época. A pesar de que habían ido mejorando desde su invención, las baterías seguían aún presentando una vida demasiado corta y una intensidad de corriente poco constante, por lo que el intento de Ampère de realizar tomas de datos prolongadas en el tiempo, cambiando el ángulo poco a

poco, no pudo obtener ningún fruto, más allá de volver a mostrar de forma experimental la interacción entre dos corrientes.

### ***2.3.4 Dispositivo de alineación terrestre***

Tras el fracaso de la nueva balanza de corrientes, de la que esperaba poder tomar datos de forma precisa, Ampère intuyó que buena parte de las desviaciones que encontraba en los experimentos que hacía podían deberse a la acción del omnipresente campo magnético terrestre, por lo que decidió dedicar sus siguientes experiencias a buscar una manera de probar la gran influencia que este campo podía estar teniendo sobre sus investigaciones.

Tras haber observado que la perturbación respecto a lo esperado era mayor cuando se trataba de cables que encerraban una gran superficie, Ampère propuso la fabricación de un experimento que presentase una corriente (no superposición de espiras) capaz de alinearse con el campo magnético terrestre, pues esto había sido observado únicamente para corrientes bajo la influencia de un imán. Para este propósito, desarrolló un anillo de gran diámetro capaz de rotar libremente en torno al eje vertical.



*fig 14. Dispositivo de alineación terrestre (brújula).*

Esta espira de gran tamaño se orientaba de forma este-oeste cuando por ella pasaba una corriente. Además, Ampère introdujo un segundo anillo para volver a comprobar el efecto de alineación observado en el dispositivo para la alineación de corrientes. Este experimento se puede comprender mediante la modelización

de la espira como un dipolo que sufre un momento de las fuerzas en cada extremo, llevando a que el sistema se mantenga en equilibrio cuando este sea nulo, de forma que

$$\vec{m} = NIA\hat{n} = N\pi r^2\hat{n} \quad (20)$$

$$\vec{\tau}_{min} = \vec{m} \times \vec{B} = N\pi r^2 B \sin \theta \hat{z} = 0 \Leftrightarrow \theta = 0. \quad (21)$$

Esto implica que el sistema llegará al equilibrio cuando el dipolo esté orientado paralelamente al campo terrestre; es decir, cuando el plano de la espira se encuentre perpendicular al mismo.

### 3. La diversificación de la electrodinámica: Michael Faraday

#### 3.1 Primer contacto con corrientes eléctricas en Reino Unido

Como hemos dicho anteriormente, la primera institución a la que Volta comunicó la invención de la pila fue la *Royal Society* londinense, cuyos miembros quedaron fascinados por las posibilidades que ese dispositivo parecía ofrecer. La pila fue objeto de profundo estudio durante algún tiempo y no hubo que esperar mucho hasta que se desarrollara un modelo más limpio y manejable que permitiese realizar experimentos en los que la pila estuviese involucrada sin tener que preocuparse del buen funcionamiento de esta.

El primer fenómeno observado gracias a la pila voltaica fue la electrólisis del agua, por parte de William Nicholson y Anthony Carlisle, al estudiar el comportamiento de la corriente eléctrica en diferentes entornos. A pesar de no ser los primeros científicos en tratar con este fenómeno, pues Martin van Marum ya había observado este efecto para diferentes elementos usando botellas de Leiden, sí que fueron los primeros en ser conscientes de lo que estaban observando: la separación de una sustancia, en este caso agua, en sus componentes fundamentales, hidrógeno y oxígeno. No obstante, la razón de estos elementos, 2:1, desconcertaba a los científicos de la época y el origen del fenómeno fue altamente controvertido hasta 1806, año en el que Humphry Davy consiguió desarrollar una explicación que involucraba una polarización de los elementos del compuesto en cada uno de los terminales sumergidos en el líquido. La explicación dada por el científico córnico, unida al experimento planteado para poder



encontrar de forma precisa la relación de elementos descompuestos, fueron clave para que este científico alcanzase la notoriedad que le permitió tener acceso a los dispositivos galvánicos más avanzados de su época. De hecho, la buena comprensión que demostró tener Davy sobre la electrólisis le permitió ser descubridor de casi diez elementos, aparte de otras sustancias compuestas, concretamente *B, Ba, Ca, Cl, I, K, Mg, Na* y *Sr*.

La ambición de Davy por estudiar nuevos compuestos y elementos resultaba en prácticas poco cuidadosas, e incluso auto-experimentales, que le llevaron a la pérdida de visión temporal tras sufrir un accidente con la explosión de *NCl<sub>3</sub>*. Para poder seguir investigando durante el periodo de convalecencia, Davy contrató a un joven estudiante que le había hecho llegar unas transcripciones de sus conferencias en el *Royal Institute*, Michael Faraday. Tras algún tiempo siendo asistente de Davy, Faraday fue nombrado Asistente Químico en la *Royal Society*, de forma que tuvo acceso a importantes medios que le permitieron comenzar a desarrollar su carrera de forma temprana, haciendo avances en el campo de la química, tanto junto a Davy como por su cuenta. Con la llegada de la noticia del experimento de Ørsted y su posterior verificación, Davy, presidente de la *Royal Society* en aquel momento, encargó la redacción de una memoria con todos los fenómenos y experimentos conocidos sobre electromagnetismo hasta el momento, que constituían, mayoritariamente, los expuestos por Ampère a lo largo de los años 1820 y 1821, aunque también los de Arago, Biot, etc.

### **3.2 La rotación como fundamento del electromagnetismo**

Tras la publicación del texto que recogía todo lo relacionado con el fenómeno electromagnético, Faraday buscó replicar la mayor parte de los experimentos sobre los que había leído, desde la experiencia de Ørsted hasta los dispositivos para mostrar interacción entre cables con corriente de Ampère. Debido a esto, consiguió desarrollar una profunda intuición sobre la naturaleza de los efectos producidos por el electromagnetismo, introduciendo la idea de las interacciones entre corrientes (e imanes) como resultado de la superposición de “rotaciones”, cuyo efecto representaba de forma gráfica debido a su falta de dominio con el formalismo matemático.

### 3.2.1 Visualización del campo magnético

Esta hipótesis, extraída en gran parte de la idea de interacción en forma de hélice de Ørsted, pudo ser demostrada por Faraday mediante el uso de varias agujas magnéticas dispuestas en un papel que atravesaba un cable, de forma que estas se orientaban de forma tangencial formando un círculo.

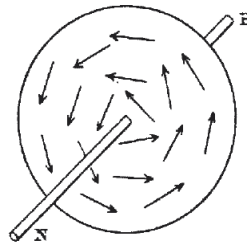


fig 15. Orientación de agujas magnéticas alrededor de un cable.

Este fenómeno no es más que una generalización del fenómeno original observado por Ørsted, por lo que no hace falta mayor explicación que la proporcionada para el experimento original.

Faraday intuyó que, idealmente, las agujas se dispondrían a modo de polígono en torno al cable. Extrapolando este fenómeno a un “polígono de infinitos lados”, pudo modelar este campo como círculos con un sentido u otro en función de la corriente, llegando a concebir la interacción entre dos corrientes como resultado de la superposición de estas rotaciones, como vemos en la figura 15.

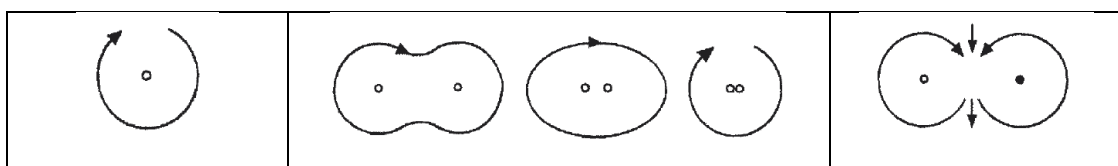
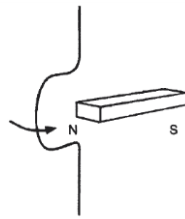


fig 16. Campo en una corriente (izq.), interacción entre dos corrientes paralelas (centro) e interacción entre dos corrientes antiparalelas (dcha.).

### 3.2.2 Dispositivo de rotación electromagnética

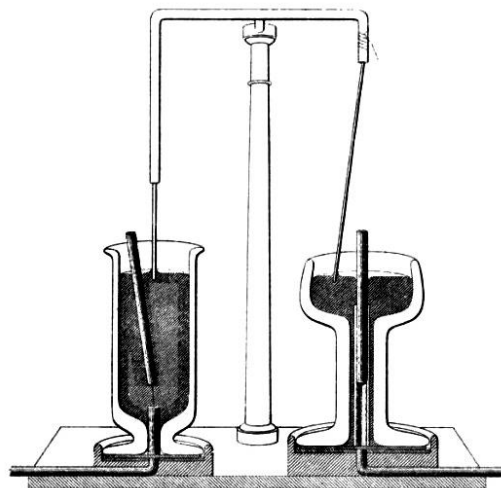
Tras haber estudiado los fenómenos observados por Ampère, Faraday estudió el efecto que tendría un imán en cables *exóticos*, fuera de los casos rectilíneos que obsesivamente había estudiado el francés. Como primer acercamiento a estas inquietudes, Faraday realizó una curva en el cable por el que atravesaba la corriente y lo colocó cerca del polo de un imán. En el momento

en el que la corriente se activaba, el cable empezaba a girar, interrumpiendo su trayectoria al chocar con el imán.



*fig 17. Primer contacto con el movimiento de rotación debido a un imán.*

Al observar esta propiedad, Faraday asumió que estaba ante un fenómeno del electromagnetismo que había pasado por alto Ampère, la posibilidad de generar un movimiento continuo del cable o el imán. Con la finalidad de mostrar claramente esta acción, Faraday ideó dos dispositivos análogos que podían moverse libremente sin encontrar impedimento, introduciendo un elemento fijo (cable o imán) en un recipiente con mercurio, líquido conductor, y dejando el otro (imán o cable) libre por un extremo, de forma que pudiese rotar de forma inclinada en torno al eje vertical, realizando la superficie de un cono.



*fig 18. Dispositivo de rotación de imán (dcha.) y de cable (izq.).*

Realizar un estudio pormenorizado de este motor no es sencillo, pero sí es posible obtener unos resultados cualitativos que nos permitan justificar el movimiento en términos globales para el de la corriente móvil. Utilizando coordenadas cilíndricas

$$\overrightarrow{dF} = I(\overrightarrow{dl} \times \overrightarrow{B}) = IB((-dz\hat{z} + dr\hat{z}) \times \hat{z}) = -IBdr\hat{\phi} \quad (22)$$

$$\overrightarrow{d\tau} = \vec{r} \times \overrightarrow{dF} = -IBrdr\hat{z}. \quad (23)$$

Como  $\hat{z}$  no varía,

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{\tau} = -IB \left( \int r dr \right) \hat{z} \Rightarrow \vec{L} = f(r, t) \hat{z}, \quad (24)$$

por lo que podemos ver que la rotación ocurrirá en círculos alrededor del eje vertical. Respecto al que presenta movimiento en el imán, el procedimiento sería análogo a este, por lo que no se desarrollará de nuevo.

### 3.3 El descubrimiento de la inducción electromagnética

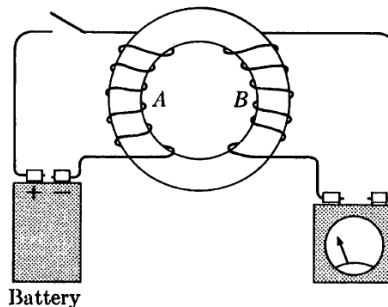
Tras haber observado con claridad la creación de un campo magnético debido al paso de una corriente, realizando la mayor parte de los experimentos conocidos que relacionaban esos dos fenómenos, Faraday quiso buscar una manera de generar una corriente mediante el uso de un imán, pues entendía que este fenómeno debía ser recíproco. Tras realizar en 1824 una serie de experimentos fallidos que involucraban corrientes e imanes, Faraday apartó a un lado esa idea y centró el grueso de su trabajo hasta 1831 en la construcción de cristales pesados y el estudio de los fenómenos ópticos que estos presentaban, que lo llevarían en 1845 al descubrimiento de la rotación del plano de polarización de la luz en presencia de un campo magnético, dando paso, de forma similar a Ørsted, a una nueva conjunción de fenómenos en apariencia independientes.

#### 3.3.1 Dispositivo de inducción mutua

A partir del año 1831 Faraday retomó los experimentos puramente electromagnéticos, volviendo a la idea de encontrar una manera de generar corriente mediante un campo magnético. La concepción que tenía el científico británico sobre el campo que ocupaba el espacio alrededor de la corriente le hacía sospechar de la posibilidad de que la corriente en un conductor pudiese generar otra en otro conductor situado a una cierta distancia. Este efecto fue inicialmente observado cuando, colocando dos cables cerca, uno de los cuales se encontraba conectado a un galvanómetro, Faraday observó una leve variación de intensidad justo al encender o apagar la corriente a través del otro. Siendo consciente de que

el efecto que había observado era una inducción de corriente debida a otra corriente, Faraday buscó magnificarlo para poder estudiarlo con claridad, dando como resultado el desarrollo del primer instrumento capaz de inducir corriente a distancia.

El dispositivo de inducción mutua construido por Faraday consistía en un anillo de hierro con dos conductores enrollados diametralmente opuestos. Uno de ellos estaba conectado a una fuente de corriente, mientras que el otro estaba conectado a un galvanómetro. Al hacer pasar la corriente, o interrumpirla, a través del primer conductor, podía observarse una medida de corriente en el galvanómetro que dependía del número de vueltas que tuviesen enrollados ambos cables.



*fig 19. Dispositivo de inducción mutua.*

El fundamento para este experimento tiene que ver con el concepto de flujo magnético, y puede ser explicado mediante la ley de Faraday: la fem inducida alrededor de un camino cerrado es igual al contrario de la variación de flujo magnético encerrado en ese camino.

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi_B}{dt}. \quad (25)$$

De la misma forma, una fem (que lleva asociada una corriente) puede generar un flujo magnético que, concretamente para el caso que nos atañe, dependerá del número de vueltas que tenga el cable enrollado, de forma que

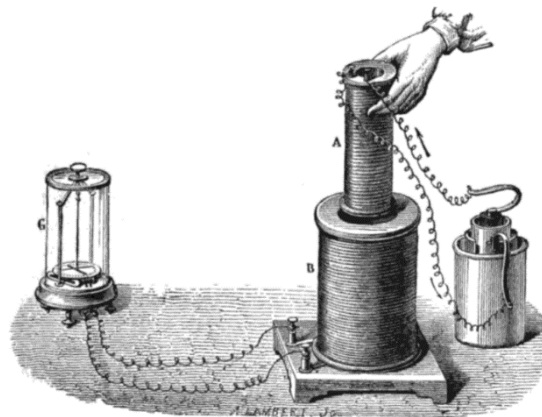
$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi_B}{dt}. \quad (26)$$

Así pues, el encendido/apagado de la corriente genera una variación de flujo magnético que a su vez induce una fem (y una corriente) en el conductor conectado al galvanómetro. Además, es posible encontrar una relación para la tensión inicial y final, tal que

$$\frac{V_A}{V_B} = \frac{I_A}{I_B} = \frac{N_A}{N_B}. \quad (27)$$

### **3.3.2 Inducción producida por un imán**

Faraday probó a quitar el núcleo de hierro en el dispositivo de inducción mutua para estudiar si este era realmente necesario. Al ser este prescindible y viendo el éxito obtenido con el dispositivo, Faraday probó a introducir un imán en el segundo solenoide, observando claramente una corriente cuando este se movía por su interior. Finalmente había conseguido inducir una corriente mediante el uso de un campo magnético, que confirmaba una reciprocidad en las interacciones imán-corriente.



*fig 20. Inductor de corriente mediante imán (electroimán).*

La explicación de este experimento es exactamente igual a la del anterior: un cambio en el flujo magnético induce una fem en el solenoide. El único cambio entre los dos es que el imán (o electroimán) podía ser desplazado manualmente y, por lo tanto, se podía controlar con mayor precisión el cambio de flujo magnético que experimentaba el solenoide.

## **4. Primeros inventos derivados del electromagnetismo**

A lo largo de este trabajo, se han recogido diferentes experimentos cuya finalidad estaba más centrada en la observación de los fenómenos fundamentales

presentes en el electromagnetismo, y no tanto en su utilidad práctica más allá de ellos<sup>2</sup>. No obstante, los conocimientos que se derivaron de los experimentos realizados por Ampère y Faraday permitieron la invención de ciertos aparatos que serían fundamentales para el propio desarrollo de la disciplina. Aunque es probable que exista un gran número de invenciones que puedan entrar en esta descripción, este apartado recogerá, sucintamente, los tres que mayor relación directa guardan con los científicos que hemos tratado.

#### 4.1 El galvanómetro

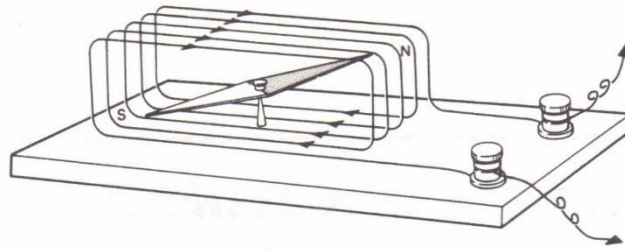
Tras las primeras noticias del descubrimiento de Ørsted, las réplicas del experimento se sucedieron a lo largo del continente, de forma que ciertos fenómenos fueron observados de forma casi simultánea en diferentes puntos. Un ejemplo de esto fue la percepción de una posible relación entre la intensidad de la incandescencia de un cable por el que pasaba corriente y la desviación de la brújula producida por esta. De esta forma, se podía observar la existencia de una dependencia de la desviación de la brújula con la intensidad de corriente, lo cual había sido notado por Ørsted originalmente, y se abría la puerta a una posible medición cuantitativa de la corriente eléctrica.

Aunque Ampère propuso, tras realizar los primeros experimentos sobre la interacción electromagnética, la posibilidad de fabricar un dispositivo que pudiese medir la corriente por un cable, declaró que esto podría haber sido desarrollado ya en algún lugar de Europa, tras recibir noticias de planteamientos semejantes, por lo que no consideró poder reclamar la autoría del mismo. En efecto, en septiembre de 1820 ya había sido desarrollado un dispositivo centrado en medir este efecto por parte de Johann Schweigger, el conocido como multiplicador de Schweigger, que consistía en un cable enrollado varias veces sobre una brújula. Este dispositivo, considerado el primer galvanómetro, dependía del campo magnético terrestre para realizar la medida y tenía que ser orientado con el mismo para poder realizar una medida precisa, por lo que no

---

<sup>2</sup> Una posible excepción sería el dispositivo para la medición de la dependencia angular (2.3.3), pero Ampère no pudo utilizarlo de la forma que estaba planteado, por lo que no se puede decir que sea un invento práctico.

pasó mucho tiempo hasta que fue descartado por otros basados en agujas astáticas.



*fig 21. Multiplicador de Schweigger.*

El fundamento de este dispositivo viene dado en la explicación de los primeros experimentos tratados. La aguja se orienta hacia el campo magnético presente, y este está compuesto de varias componentes, la debida al campo terrestre y la generada por los cables. La presencia de varias vueltas permitía tener una mayor influencia magnética por parte de la corriente y, por lo tanto, una mayor sensibilidad.

#### **4.2 El electroimán**

Aunque los imanes eran bien conocidos desde la antigüedad y se disponía de conocimiento y medios para fabricarlos, la cuantificación del poder magnético del material no estaba tan clara. Era difícil cuantificar un fenómeno que no se comprendía más allá de un comportamiento único, casi místico (no es casualidad que aún hoy se siga usando el magnetismo en pseudociencias varias). Por esto, la exploración de la dependencia de los efectos generados con las características del imán no pudo ser desarrollada plenamente hasta la invención del electroimán, un dispositivo capaz de generar propiedades magnéticas controlables por la cantidad de corriente.

Ampère ya había hecho notar en sus primeros experimentos, concretamente los relacionados con la hélice galvánica (2.2.3), que un enrollamiento de cable podía ser modelado como un imán, pues presentaba una sensibilidad al campo magnético terrestre similar a una brújula imantada. No obstante, el científico francés no fue más allá en esta observación, y hubo que esperar a 1824 para poder encontrar el primer ejemplo de electroimán propiamente dicho por parte de William Sturgeon<sup>21</sup>.



Este aparato consistía en un núcleo de hierro con forma de herradura que tenía enrollado un cable a lo largo de la curva. Cuando la corriente estaba encendida, el hierro adquiría propiedades magnéticas equiparables a las de un imán común.

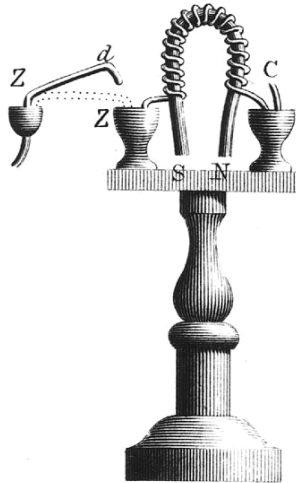
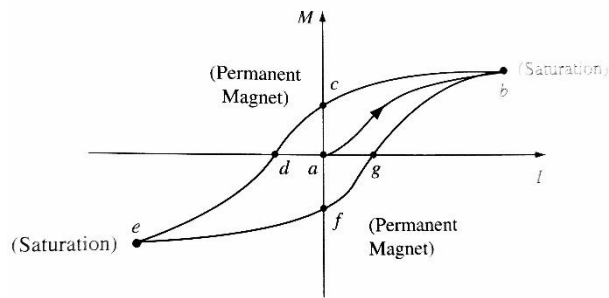


fig 22. *Electroimán de Sturgeon.*

El motivo de que un solenoide pueda ser considerado equivalente a un imán ha sido analizado a lo largo del trabajo y no supone el elemento de mayor interés del electroimán, sino que son las propiedades del material utilizado en el núcleo lo que permite la magnificación del efecto magnético. El invento de Sturgeon utilizaba un núcleo de hierro, el cual es un material ferromagnético: presenta dominios magnéticos que funcionan como dipolos magnéticos y que son susceptibles al campo magnético externo. Estos dipolos están orientados de forma aleatoria en el material, pero tienden a orientarse con el campo magnético externo y, bajo ciertas condiciones, pueden *recordar* la orientación impuesta por un campo tras la desaparición de este. Al aumentar la corriente en el cable enrollado en el núcleo de hierro, creamos un campo magnético que alinea los dipolos en el conductor, dando lugar a un efecto magnético mayor al del campo de la corriente. La magnetización que adquiere un material ferromagnético al variar suavemente la intensidad sigue un camino denominado ciclo de histéresis, que depende del material y tiene una forma aproximada a la que podemos ver en la figura 22.

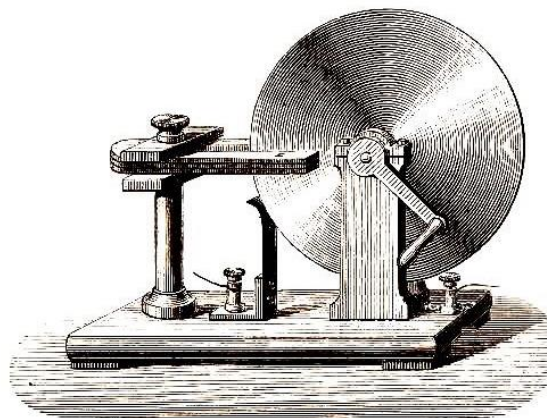


*fig 23. Ciclo de histéresis.*

Comenzando de un punto de desimantación macroscópica, la magnetización va aumentando hasta saturar a partir de un valor de intensidad. Si disminuimos esta suavemente, se alcanza un valor de magnetización en ausencia de campo generado por la corriente (magnetización permanente) y, si continuamos, podremos llegar a la saturación de la magnetización de valor opuesto al obtenido al principio.

#### **4.3 El generador de corriente**

Tras estos primeros experimentos de inducción electromagnética, Faraday pudo avistar la posibilidad de fabricar un dispositivo que fuese capaz de generar una corriente eléctrica de forma continua a partir del movimiento. Mediante el uso de un imán con forma de herradura y un disco de cobre que giraba entre los brazos del imán y estaba conectado a un cepillo metálico unido al borne del generador, Faraday construyó el primer aparato capaz de generar una corriente de forma mecánica. No obstante, el dispositivo no presentaba gran utilidad debido a la baja tensión que producía, por lo que no tardó en quedar eclipsado por otros generadores más capaces.



*fig 24. Disco de Faraday.*

La explicación para este fenómeno puede ser encontrada en la fuerza de Lorentz,

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}). \quad (28)$$

Tomando el campo eléctrico nulo, podemos calcular la fem usando coordenadas cilíndricas con la integral de la fuerza magnética por unidad de carga en todo el disco, de radio  $R$ ,

$$\varepsilon = \int_0^R (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot \vec{d\rho} = \int_0^R (\omega \rho \hat{\phi} \times B \hat{z}) \cdot \vec{d\rho} = \omega B \int_0^R \rho \hat{\rho} \cdot \vec{d\rho} = \omega B \int_0^R \rho d\rho \quad (29)$$

$$\varepsilon = \frac{\omega B R^2}{2}. \quad (30)$$

## Conclusiones

A lo largo del trabajo hemos podido observar algunos de los caminos tomados por los científicos que fueron clave en el desarrollo del electromagnetismo primitivo. Tanto Ørsted como Ampère o Faraday tuvieron que afrontar los fenómenos que relacionaban electricidad y magnetismo sin tener una base sólida de los fundamentos que los generaban, por lo que el desarrollo de nuevos experimentos recaía, casi enteramente, en especulaciones basadas en lo que podían observar con los dispositivos disponibles. Cada uno de ellos utilizaba las herramientas que tenía a su disposición para expresar los procesos que generaban la interacción electromagnética, y no todos ellos fueron obtenidos de forma *científica* (i.e. Ørsted consideraba esta interacción como resultado de un “conflicto” entre electricidad y magnetismo que se propagaba en hélice alrededor del cable; Ampère se resistió al desarrollo formal de Biot y buscó desarrollar su teoría a base de tomas de datos; Faraday introdujo las líneas de campo por su escasa habilidad matemática; etc.).

Con esto, podemos ver que el desarrollo científico depende, en muchas ocasiones, de ideas erróneas, concepciones incompletas, ocurrencias infundadas (aunque correctas) y otros factores que difícilmente podrían ser catalogados como estrictamente veraces. Podemos extraer de este trabajo que ninguna teoría surge de la nada y lo que permite depositar confianza en la solidez de cada paradigma son los pequeños pasos que cada época pasada ha ido dando, descartando y/o recuperando ideas, creando otras, difundiendo los avances, etc.

## Fuentes de las imágenes

A la hora de elegir las imágenes, se priorizaron las ilustraciones originales presentadas por los propios autores. Las que no han podido ser encontradas en fuentes primarias, han sido tomadas de textos cercanos al momento del dispositivo original.

- *fig. 1 y 2 (arriba)*<sup>22</sup>.
- *fig. 2 (abajo)*<sup>23</sup>.
- *fig. 3*<sup>24</sup>.
- *fig. 4 y 11*: creación propia.
- *fig. 5-10, 13 y 14*<sup>10</sup>.
- *fig. 12, 15, 16 y 17*<sup>1</sup>.
- *fig. 18*<sup>25</sup>.
- *fig. 19*<sup>4</sup>.
- *fig. 20 y 24*<sup>26</sup>.
- *fig. 21*<sup>27</sup>.
- *fig. 22*<sup>21</sup>.
- *fig. 23*<sup>5</sup>

## Bibliografía

1. Steinle, F. *Exploratory experiments: Ampère, Faraday, and the Origins of Electrodynamics*. (University of Pittsburg Press, 2016).
2. Wise, M. N. Electromagnetic theory in the Nineteenth Century. in *Companion to the History of Modern Science* 342–356 (1990).
3. Holton, G. & Brush, S. G. Electrostatics. in *Physics, the Human Adventure: From Copernicus to Einstein and Beyond* 352–368 (Rutgers University Press, 2001).
4. Holton, G. & Brush, S. G. Electromagnetism, X-Rays, and Electrons. in *Physics, the Human Adventure: From Copernicus to Einstein and Beyond* 369–387 (Rutgers University Press, 2001).
5. Griffiths, D. J. *Introduction to Electrodynamics*. (Pearson, 2019).
6. Jacobsen, A. S. “Anschauung” versus visión matemática en Oersted: “Quizás es hora de que las matemáticas intenten acercarse a la Filosofía Natural.” in *Ciencia y Romanticismo* 229–254 (Meyer, 2002).
7. Oersted, H.-C. New Electromagnetic Experiments. *Annals of Philosophy* 16 375–377 (1820).
8. Oersted, H.-C. Experiments on the Effect of a Current of Electricity on the Magnetic Needle. *Annals of Philosophy* 16 273–276 (1820).
9. Stringari, S. & Wilson, R. R. Romagnosi and the discovery of electromagnetism. *Rend. Fis. Acc. Lincei* 11, 115–136 (2000).

10. Ampère, A.-M. Suite du Mémoire sur l'Action mutuelle entre deux courants électriques, entre un courant électrique et un aimant ou le globe terrestre, et entre deux aimants. *Annales de Chimie et de Physique* 15 170–218 (1820).
11. Ampère, A.-M. Mémoire présenté à l'Académie des Sciences, le 2 octobre 1820, ou se trouve compris le résumé de ce qui avait lu à la même Académie les 18 et 25 septembre 1820, sur les effets des courants électriques. *Annales de Chimie et de Physique* 15 59–76 (1820).
12. Steinle, F. Challenging established concepts: Ampère and exploratory experimentation. *Theoria: An International Journal for Theory, History and Foundations of Science* 17, 291–316 (2002).
13. Faraday, M. On some new electro-magnetical motions, and on the theory of magnetism. *The Quarterly Journal of Science, Literature and the Arts* 12, (1822).
14. Faraday, M. Experimental researches in Electricity. *Philosophical Transactions* 122 125–162 (1832).
15. Faraday, M. Experimental Researches in Electricity. Twentieth Series. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 136 21–40 (1845).
16. Küstler, G. Diamagnetic Levitation - Historical Milestones. *Revue Roumaine des Sciences Techniques. -Électrotechn. et Énergetique* 52, 265–282 (2007).
17. Steinle, F. Looking for a “simple case”: Faraday and electromagnetic rotation. *History of Science* 33 179–202 (1995).
18. Vanzo, A. Empiricism and Rationalism in Nineteenth-Century Histories of Philosophy. *Journal of the History of Ideas* 77, 253–282 (2016).
19. Davy, H. On the Magnetic Phenomena Produced by Electricity. *Philosophical Transactions of the Royal Society* 111, 7–19 (1821).
20. Yung, K. W., Landecker, B. & Villani, D. D. *An analytic solution for the force between two magnetic dipoles. Magnetic and Electrical Separation* vol. 9 (1998).
21. Sturgeon, W., Christie, S. H., Gregory, O. & Barlow, P. Improved Electro-Magnetic Apparatus. *Transactions of the Society, Instituted at London, for the Encouragement of Arts, Manufactures, and Commerce* 43, 37–52 (1824).
22. Volta, A. On the Electricity excited by the mere Contact of conducting Substances of different kinds. *Philosophical Transactions* 90 403–431 (1800).
23. Museo Galileo - Enlarged image - Trough battery.  
<https://catalogue.museogalileo.it/gallery/TroughBattery.html>.
24. Privat-Deschanel, A. *Elementary Treatise on Natural Philosophy*. vol. 3 (1876).
25. Faraday, M. *Experimental researches in electricity*. vol. 2 (1844).

26. Alglave, É. & Boulard, J. *La lumière électrique: son histoire, sa production et son emploi dans l'éclairage public*. (1882).
27. Schweigger's galvanometer Physics Homework Help, Physics Assignments and Projects Help, Assignments Tutors online. <https://physicsmax.com/schweiggers-galvanometer-7781>.

## Anexo I

Conclusiones a los primeros experimentos realizados por Ampère<sup>10</sup> (traducción propia del francés):

1. Dos corrientes eléctricas se atraen cuando se mueven paralelamente en el mismo sentido; y se repelen cuando se mueven paralelamente en sentido contrario.

2. Cuando los cables solo pueden girar en los planos paralelos, cada una de esas dos corrientes tiende a llevar a la otra a una situación donde esta le sea paralela y dirigida en el mismo sentido.

3. Estas atracciones y repulsiones son completamente diferentes de las atracciones y repulsiones ordinarias.

4. Todos los fenómenos analizados por mí que presenta la acción mutua de una corriente eléctrica y de un imán, descubierta por D. Ørsted, y que he reducido a dos “hechos generales” en una Memoria anterior, leída en la Academia el 18 de septiembre de 1820, entran dentro de la ley de atracción y de repulsión de dos corrientes eléctricas, la cual acaba de ser enunciada, admitiendo que un imán no es más que una unión de corrientes eléctricas que son producidas por una acción de las partículas del acero, unas sobre otras de forma análoga a los elementos de una pila voltaica, y que tienen lugar en los planos perpendiculares a la línea que une los dos polos del imán.

5. Mientras que el imán está en la situación a la que tiende por acción del globo terrestre, estas corrientes son dirigidas en sentido contrario al del movimiento aparente de Sol; de forma que cuando colocamos el imán en la posición contraria, con motivo de que esos dos polos que apunten a sus respectivos polos terrestres, las mismas corrientes se encuentran en el sentido del movimiento del Sol.

6. Los fenómenos conocidos que observamos cuando dos imanes actúan entre sí entran en la misma ley.

7. Lo mismo ocurre con la acción que el globo terrestre ejerce sobre un imán, admitiendo en él corrientes eléctricas en planos perpendiculares a la dirección de la aguja de inclinación, y que se mueven de este a oeste por debajo de esa inclinación.



8. No hay un exceso en uno de los polos de un imán que en el otro; la única diferencia que existe entre ellos es que uno se encuentra a la derecha y el otro a la izquierda de las corrientes eléctricas que dan al acero sus propiedades magnéticas.

9. Mientras que Volta probó que las dos electricidades, positiva y negativa, de dos extremidades de la pila se atraían y repelían según las mismas leyes que las dos electricidades producidas por los medios comunes conocidos anteriormente a él, este no había podido demostrar completamente la identidad de los fluidos puestos en acción por la pila y el frotamiento; mas esta identidad ocurrió cuando demostró que los dos cuerpos, uno conteniendo electricidad por contacto metálico y el otro, por frotamiento, actuaban, en todas las circunstancias, el uno sobre el otro como se hubiesen comportado las dos electricidades en la pila o en la máquina eléctrica ordinaria. El mismo tipo de pruebas se encuentra aquí al considerar la identidad de las atracciones y repulsiones de las corrientes eléctricas e imanes. He demostrado en la Academia la acción mutua de dos corrientes y que los fenómenos entre dos imanes conocidos desde la antigüedad siguen la misma ley, de forma que se ha demostrado que los fluidos eléctricos y magnéticos están sometidos a las mismas leyes, como se ha admitido desde hace tiempo, y el único cambio a realizar en la teoría ordinaria de la imanación sería admitir que las atracciones y repulsiones magnéticas no deben ser equiparadas a aquellas resultantes de la tensión eléctrica, sino a aquellas que he observado entre dos corrientes.