



**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA
NACIONAL**

**SOBRE LAS INTERACCIONES ELECTROMAGNÉTICAS: UNA
RECONSTRUCCIÓN HISTÓRICA A PARTIR DEL MODELO DE ACCIÓN A
DISTANCIA EN CONTRASTE CON LA NOCIÓN DE CAMPO**

Johan Mateo Sisa Estupiñan

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
BOGOTÁ D.C.
2023

**SOBRE LAS INTERACCIONES ELECTROMAGNÉTICAS: UNA
RECONSTRUCCIÓN HISTÓRICA A PARTIR DEL MODELO DE ACCIÓN A
DISTANCIA EN CONTRASTE CON LA NOCIÓN DE CAMPO**

Johan Mateo Sisa Estupiñan

Trabajo de grado para optar por el título de:
Licenciado en Física.

Asesor:
M.Sc. Fernando Isidro Espitia Castañeda

Línea de Investigación:
La enseñanza de la física y su relación física matemática

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
BOGOTÁ D.C
2023

“La ciencia es como la poesía de la realidad, capaz de revelar la belleza oculta en los fenómenos más simples, y es mediante la exploración apasionada de la naturaleza que desentrañamos los misterios que nos rodean. En el vasto lienzo del universo, la imaginación humana es simplemente un pincel, y nuestras teorías son las pinceladas que intentan capturar la intrincada obra maestra que es la creación. Así, en cada descubrimiento, nos encontramos no solo con respuestas, sino también con nuevas preguntas que nos invitan a seguir explorando, recordándonos que la verdadera esencia de la ciencia yace en la perpetua búsqueda del conocimiento”.

Richard Feynman

Agradecimientos

Quisiera expresar mi más profundo agradecimiento a Dios, fuente de fortaleza y guía en cada paso de este arduo pero gratificante camino académico.

A mis padres, cuyo amor incondicional y apoyo constante han sido los pilares que han sostenido mi travesía. Su sacrificio y dedicación son la razón de mis logros.

A mi hermano Santiago, cómplice de risas y consejero en momentos difíciles, agradezco su apoyo constante y le atribuyo todo el crédito por su apoyo en la elaboración de las imágenes. Su aliento ha sido mi motor.

A Paola, agradezco su constante ánimo por escucharme y apoyarme con su gran talento en la redacción de este documento. Su presencia ha sido un regalo inigualable.

A mi asesor Fernando, agradezco sinceramente su experiencia, dedicación y orientación a lo largo de este proyecto. Su contribución ha sido fundamental para el éxito de esta investigación.

Y por último, agradezco a todas aquellas personas que de alguna otra forma influyeron en mi vida y en mi forma de pensar.

Este logro no habría sido posible sin el amor, la fe y el respaldo de cada uno de ustedes. Agradezco humildemente su presencia en este significativo capítulo de mi vida.

Contenido

Agradecimientos	vii
Introducción	1
1. Problemática	2
1.1. Objetivos de la investigación.	4
1.2. Antecedentes	4
2. Acción a distancia en electromagnetismo	6
2.1. Modelo de acción a distancia	6
2.2. Argumentos en contra de la acción a distancia	8
2.3. Aceptación de la acción a distancia como modelo	9
2.4. Acción a distancia en la electrostática	10
2.5. Acción a distancia en la electrodinámica	12
2.6. Acción a distancia en la inducción electromagnética	14
3. Interacción electromagnética debida al campo	18
3.1. René Descartes y Gottfried Leibniz	19
3.1.1. Sobre la extensión	19
3.1.2. Sobre el movimiento	20
3.1.3. Sobre la fuerza	21
3.2. Michael Faraday	23
3.2.1. Rotaciones electromagnéticas	23
3.2.2. Inducción electromagnética	24
3.2.3. El modelo de Campo de Faraday	28
3.3. James Clarke Maxwell	30
3.3.1. La influencia de Faraday	31
3.3.2. Modelo de Campo de Maxwell	33
3.3.3. Ecuaciones de Campo de Maxwell	35
3.3.4. La luz como fenómeno electromagnético	38
4. El descubrimiento de las ondas electromagnéticas	42
4.1. Interpretaciones sobre las interacciones electromagnéticas	42
4.2. Experimentos de Hertz y resultados	43
4.3. Acción a distancia vs acción debida al medio	47
Conclusiones	49
Bibliografía	51

A. Anexo: Fuerza de gravedad dentro de una esfera hueca	54
B. Anexo: Fuerza de gravedad fuera de una esfera hueca	57
C. Anexo: Demostración de la ley general de Weber	60
D. Anexo: Demostración de la ley de inducción de Faraday – Lenz a partir de la ley de Weber	63
E. Anexo: Demostración vectorial corrientes de desplazamiento y ondas electromagnéticas	67

Introducción

El objetivo de las ciencias físicas es el de responder aquellos interrogantes que permiten comprender y describir el comportamiento del universo, Carl Sagan expresa que “Somos una especie que necesita entender. Inventamos preguntas porque necesitamos respuestas, y cuanto más poderosa es una pregunta, más poderosa es la ciencia”.

Un cuestionamiento recurrente en la física es ¿Cómo se produce el movimiento? La experiencia cotidiana sugiere que, gran parte se produce por contacto, por ejemplo, cuando en un partido de fútbol alguien patea el balón, el contacto entre estos genera movimiento.

La física sería realmente sencilla, si todos los movimientos se explicaran por contacto, sin embargo, existen casos donde no se observa contacto aparente con otros cuerpos: verbigracia, los movimientos celestes como el de la Luna, el Sol y los planetas o la atracción y repulsión entre imanes. Incluso, si se tuviera el poder de hacer aparecer algún objeto en el cielo, sin nada que lo lleve hasta allí, lo más coherente es pensar que, dicho objeto empezará a moverse en caída libre.

Cabe aclarar que, existieron muchas teorías que trataron de responder aquella pregunta sobre el movimiento; sin embargo, las teorías formales vinieron con el estudio de los fenómenos gravitacionales, mecánicos, termodinámicos, electromagnéticos, etc.

Particularmente, en el marco de este documento, se hace especial énfasis en los fenómenos electromagnéticos que, se describen a partir de dos modelos de interacción: la acción a distancia y la acción debida a un medio, en parte inspirado por la obra de William Berkson. Todo este abordaje se realiza con el plus de añadir imágenes que permiten una descripción de los modelos teóricos, como también ciertas demostraciones matemáticas, para formalizar algunos fenómenos físicos.

Esta monografía se compone de cuatro capítulos; en el primero, se expone la problemática junto con los objetivos y antecedentes de investigación.

Con el fin de hacer una reconstrucción histórica del modelo de acción a distancia, en el segundo capítulo, se expone el origen de dicho modelo y por qué se asocia con Newton. Seguido, se explican las principales características, argumentos en contra y las razones de su relevancia. Continuando, se presenta las interacciones a distancia aplicadas a las teorías de la electrostática, la electrodinámica y la inducción electromagnética.

En el tercer capítulo, se desarrolla el modelo de acción mediata, a través de las interacciones físicas. Inicialmente, se presentan las concepciones de extensión, movimiento y fuerza, dadas por Descartes y Leibniz. Luego, se exponen los principales experimentos de Faraday y, cómo estos, junto a las concepciones anteriores, permiten proponer un modelo de interacción, cimentado en las líneas de fuerza. Seguidamente, se muestra a Maxwell quien, en el intento de formalizar matemáticamente las ideas de Faraday, construye un modelo de interacción basado en ondas electromagnéticas.

Por último, en el cuarto capítulo, se explican los principales experimentos de Hertz y, como a partir de estos, se va convenciendo de la existencia de las ondas electromagnéticas. Seguidamente, se revela el proceso utilizado por Hertz, para calcular la velocidad finita de las interacciones electromagnéticas y, como gracias a esto, se comprueba la teoría de campo. Para el cierre, se compara los dos modelos de interacción y sus principales aportes, dejando la puerta abierta para ampliar el documento con nuevas investigaciones.

1. Problemática

Durante siglos, la humanidad ha sentido fascinación por los fenómenos electromagnéticos, las primeras indagaciones están basadas en la observación de rayos generados en tormentas y en la existencia de piedras particulares que, atraían a otras de naturaleza metálica (imanes)¹. Hacia mediados del siglo XIX, el físico James Clerk Maxwell, apoyándose en los trabajos de Faraday, Ampere y otros, desencadenó una auténtica revolución científica al predecir la estrecha relación entre los fenómenos eléctricos y magnéticos.

De esta manera, se establece una teoría unificada del electromagnetismo, que transformó radicalmente la comprensión de dichos fenómenos y tuvo profundas implicaciones en la tecnología y la industria. La obra de Maxwell se convirtió en un hito fundamental de la ciencia y sentó las bases para el desarrollo de la física moderna.

Existieron muchos factores que posibilitaron la creación de una teoría unificada del electromagnetismo, entre ellos, la controversia científica referente a cómo se dan las interacciones físicas. Estas por lo general se manifiestan en forma de fuerza entre masas, partículas cargadas, potenciales y campos. Así, por ejemplo, cuando se observan dos cuerpos que interactúan gravitacionalmente, en este caso, un asteroide que cae hacia la Tierra; cabe preguntarse ¿qué los comunica? o ¿cómo se comunican?, ¿de qué manera estos cuerpos que aparentemente se encuentran separados por una distancia, logran verse afectados por la existencia del otro?

Durante mucho tiempo, diferentes científicos intentaron dar una explicación de lo anterior, entre estas, se destacan dos modelos que se encontraban en conflicto: por un lado, estaban los seguidores de Newton, quienes sostenían que las interacciones se producen entre corpúsculos a distancia y de forma instantánea, mientras que, por otro lado, había quienes sugerían un modelo de interacción mediata².

Esta controversia permitió que se desarrollaran múltiples teorías físicas, a favor y en contra de un modelo o el otro, hasta que a finales del siglo XIX el físico alemán Heinrich Hertz comprobó experimentalmente la existencia de ondas electromagnéticas, decantando la controversia para el lado de las acciones mediatas. Gracias a su aporte, se supo que la interacción de tipo electromagnética demora un tiempo finito en comunicar los cuerpos, y no de forma instantánea como lo propone el modelo de acción a distancia.

En vista de lo previamente expuesto, el presente trabajo surge a partir del interés pedagógico sobre la enseñanza del electromagnetismo. Generalmente, al consultar el pènsum de física o ciencias de las principales universidades en Colombia, se evidencia un factor común en estos, ya que, por lo regular, se enseña primero mecánica clásica, para después pasar a los cursos introductorios de electromagnetismo. Esto no significa en sí mismo una desventaja, en cuanto a enseñar primero un curso o el otro; sin embargo, pueden presentarse diferentes desafíos.

¹El nombre de imán proviene del francés *aimant* que significa cariñoso. Su origen en latín significa piedra dura.

²Que se da en un tiempo y lugar próximo a una cosa, mediando otra entre las dos

En el artículo titulado *El uso de la historia de las ciencias en la enseñanza de la física: una aplicación para el electromagnetismo*, María Perea y Laura Buteler analizan que, en universidades y colegios, se enseña mecánica clásica desde el modelo de interacción newtoniano, mientras que, cuando se pasa a enseñar electromagnetismo se cambia el modelo de acción a distancia por el de campo desde una perspectiva maxwelliana³, que viene siendo un tipo de acción mediata. Este cambio abrupto en la enseñanza de los modelos de interacción genera un desafío, puesto que no se acostumbra a explicar por qué ya no se usan las posturas de Newton, en otras palabras, por qué es mejor aprender electromagnetismo desde el campo y no desde acción a distancia, como se venía trabajando en mecánica clásica; al respecto las autoras plantean que:

Se propicia de esta manera la no diferenciación entre la teoría newtoniana con la teoría de campos. Comúnmente, en estos casos no se explicitan adecuadamente las limitaciones de la teoría newtoniana ni las ventajas de la teoría de campos, por lo que los estudiantes terminan teniendo una visión newtoniana de la interacción. Tanto en la escuela secundaria, como en los institutos terciarios, en la universidad y hasta en la mayoría de los libros de textos de física (Perea y Buteler, 2016, p19).

Según lo anterior, los estudiantes terminan con una perspectiva newtoniana del electromagnetismo, lo cual dificulta la comprensión del concepto de campo y de interacción mediata. Con el objetivo de reducir esto, resulta importante que los futuros licenciados en física, en el momento de enseñar electromagnetismo, tengan en cuenta cómo y por qué se da la transición de la acción a distancia al campo.

Adicional, al consultar los programas de estudio de los cursos de electromagnetismo uno y dos, de la Universidad Pedagógica Nacional, se evidencia que no es recurrente una reconstrucción histórica del cambio de modelo de interacciones y se hace necesario realizarla por los motivos expuestos anteriormente. A propósito, las autoras sostienen que:

Una adecuada implementación de la historia de las ciencias en la enseñanza de la física permitiría a los docentes no solo motivar a sus estudiantes, sino también facilitar a los mismos una comprensión más profunda de los contenidos, de los procesos de la ciencia, de los factores que influyen en el desarrollo de las investigaciones científicas. (Perea y Buteler, 2016, p13).

Estas observaciones son clave en el proceso de enseñanza, ya que, la reconstrucción histórica facilita una comprensión más profunda de los conceptos en ciencias. Puntualmente, el presente trabajo de grado se enfoca en los conceptos de campo, interacción física y acción a distancia.

Por consiguiente, este documento propone una reconstrucción histórica de la controversia científica en cuestión, desde la acción a distancia hasta el modelo de campo. Además, analiza cómo el descubrimiento de las ondas electromagnéticas sirve de evidencia empírica, para favorecer el modelo de campo electromagnético, dejando atrás el modelo de interacción newtoniano. Lo anterior, con el fin de brindar una herramienta de consulta a los licenciados en física y aportar en la solución al desafío planteado.

³Que considera las interacciones con un campo preexistente en el punto a donde se sitúa la carga o la masa

Con todo esto, surge la siguiente pregunta problema y objetivos.

¿Cómo a través de una reconstrucción histórica, desde la acción a distancia newtoniana hasta el concepto de campo maxwelliano, se llega a la noción de onda electromagnética?

1.1. Objetivos de la investigación.

Objetivo general

- Realizar una reconstrucción histórica de los modelos de acción a distancia y acción mediata, con el fin de evidenciar el descubrimiento de las ondas electromagnéticas como síntesis de dichos modelos.

Objetivos específicos

- Mostrar la evolución del modelo de interacción newtoniano «acción a distancia» en el electromagnetismo, desde el siglo XVII hasta finales del siglo XIX.
- Presentar el desarrollo del modelo de interacción mediata, desde una perspectiva cartesiana hasta llegar al concepto de campo según Maxwell.
- Analizar el descubrimiento de las ondas electromagnéticas como resultado de la síntesis de los modelos de acción a distancia y acción mediata.

1.2. Antecedentes

Al comenzar con el desarrollo del presente trabajo, se tuvo en cuenta las siguientes investigaciones que, guardan relación con la problemática y la temática abordada en el documento.

Prada, W.A. (2015) De la acción a distancia al concepto de campo [Tesis]. Universidad Pedagógica Nacional

Este trabajo, se centra en el modelo de acción a distancia para la gravitación, con base en esto, se plantea una discusión sobre los puntos donde esta falla y, propone el modelo de campo como alternativa, con el fin de plantear una serie de actividades para abordar estos temas en el aula. Esto fue importante para el desarrollo del presente trabajo, dado que, proporcionó un mapeo inicial del modelo de acción a distancia y contextualizó la teoría electromagnética de Maxwell.

Cantor, D.A. (2020) Introducción a la teoría de campo electromagnético desde una perspectiva histórica [Tesis]. Universidad Pedagógica Nacional

Esta monografía presenta una reflexión propositiva sobre la historia de la ciencia y la enseñanza, tomando como referencia el concepto de campo. Desarrolla un análisis histórico-crítico de la teoría del campo electromagnético y el concepto de campo; busca identificar cuáles son los

problemas de investigación y puntos de inflexión que dieron origen y consolidaron una teoría tan importante para la física. Se relaciona con el presente trabajo de grado, al contextualizar las problemáticas que llevaron al desarrollo del concepto de campo.

M.A, y Buteler, L.M. (2016) El uso de la historia de las ciencias en la enseñanza de la física: una aplicación para el electromagnetismo [Artículo]. Revista Góndola

Este artículo de la universidad distrital (revista góndola), es pieza clave para el planteamiento y línea de desarrollo del presente trabajo, pues propone lineamientos generales para la incorporación de la historia de la ciencia en el tratamiento del concepto de campo. Se enfoca en la controversia entre “Acción a distancia” vs. “Campo”, la cual fue elaborada desde los experimentos realizados por Heinrich Hertz, a partir de las ondas electromagnéticas.

Torres A.K. (2021). Wilhelm Weber’s Main Works on Electrodynamics Translated into English [revista de investigación]. Publicado en Canadá por Apeiron (Montréal, Québec)

Este documento, recoge todos los trabajos de Wilhelm Weber y los traduce del alemán al inglés, de forma en la que sean más comprensibles para la actualidad, muestra las principales características de la acción a distancia en el electromagnetismo, en relación con los trabajos de Coulomb, Ampere y Weber. Parte de la base teórica en el presente trabajo se construyó a partir de este documento.

2. Acción a distancia en electromagnetismo

Comúnmente se le atribuye a Isaac Newton la noción de las acciones a distancia, aunque no se puede decir con certeza que Newton sostuviese esta idea explícitamente, si se puede apreciar en algunas de sus obras elementos que coinciden con este modelo. En la introducción de su obra magna, los Principia¹, se establece que:

Todos los fenómenos pueden depender de ciertas fuerzas por las cuales las partículas de los cuerpos, por causas aún desconocidas, son impelidas² unas a otras y se juntan en formas regulares, o se repelen entre sí y se alejan (Newton, 1999, p. 382).

Se puede inferir a partir de lo anterior que, en su teoría gravitatoria, Newton postula la existencia de fuerzas cuya causa es desconocida. Para comprender por qué se le atribuye a Newton el modelo de acción a distancia, es necesario primero aclarar las principales características de su teoría gravitacional.

2.1. Modelo de acción a distancia

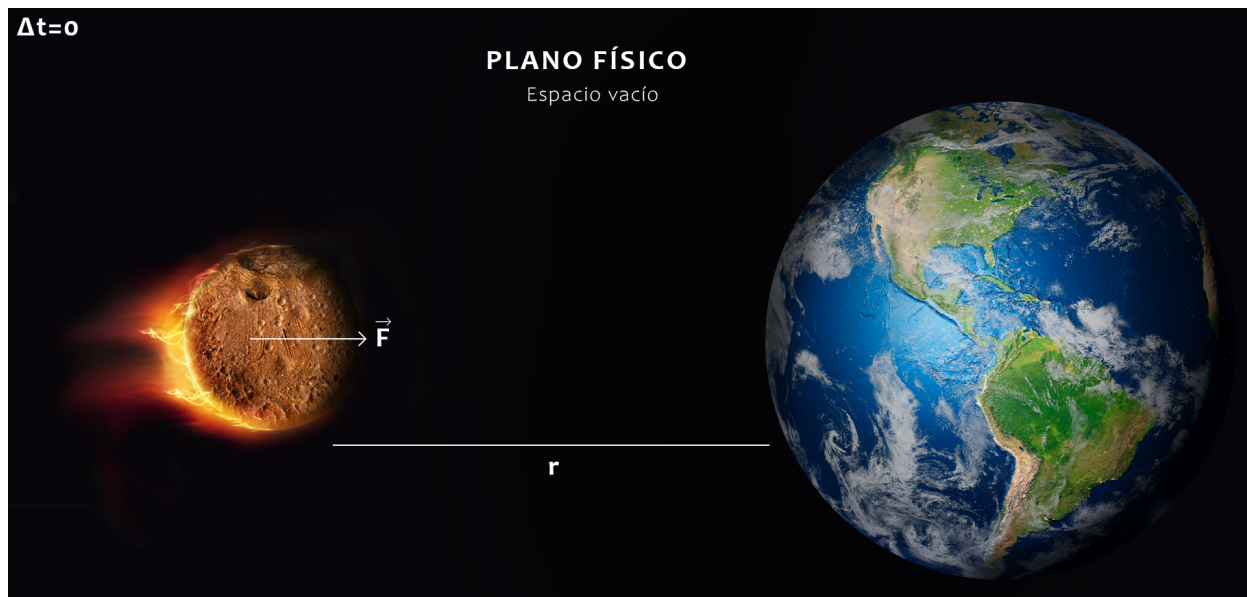


Figura 2-1.: Un asteroide atraído gravitacionalmente hacia la tierra, en el espacio vacío. Elaboración propia.

¹Philosophiæ naturalis principia mathematica (Principios matemáticos de la filosofía natural)

²Empujar o hacer mover algo

Newton desarrolló una teoría gravitacional que se sustentaba en tres pilares fundamentales. En primer lugar, se esperaba que, la materia estuviera compuesta por diminutas partículas de masa, denominadas corpúsculos. En segundo lugar, afirmaba que, el espacio físico es isotrópico (igual en todas direcciones), homogéneo (igual en cualquier lugar) y estaba completamente vacío. En tercer lugar, sostenía que, las partículas poseían la propiedad de ejercer fuerzas centrales³, que actuaban de manera directa e instantánea entre ellas. (Newton, 1999,).

La intensidad de dicha fuerza depende del producto de las masas y del cuadrado de la distancia que las separa. Es precisamente cómo actúan estas fuerzas centrales, lo que se denomina *acciones a distancia*. En otras palabras, la acción a distancia involucra partículas de masa que interactúan gravitacionalmente en el espacio vacío, sin ningún medio material que las una.

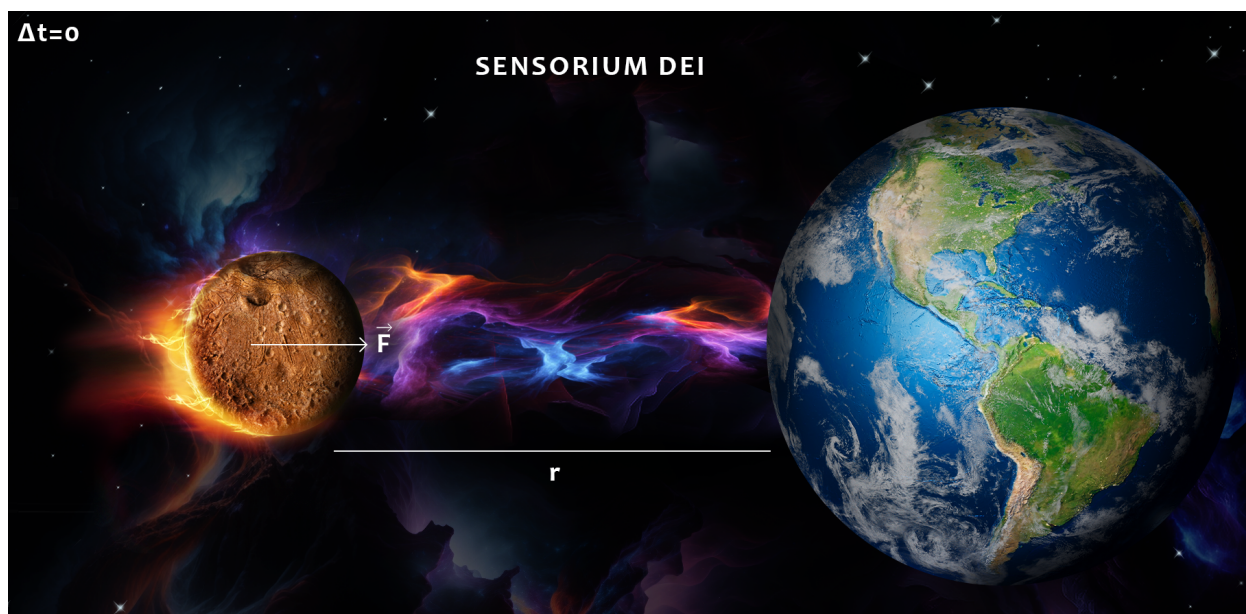


Figura 2-2.: Un asteroide atraído gravitacionalmente hacia la tierra que se comunican por medio del sensorium Dei. Elaboración propia.

Para explicar cómo se comunican las partículas de materia en el espacio vacío, Newton postuló la existencia del *Sensorium Dei*, un plano fuera del mundo físico que, lleva la información o transporta la acción de los cuerpos a través del espíritu de Dios, de alguna manera este comunicaba toda la materia. Por consiguiente, en el ejemplo anterior del asteroide y la Tierra, se puede comprender por qué estos se ven atraídos, pues Dios como un ser omnipotente y creador, posee la facultad de producir gravedad. Así que, se puede entender las interacciones como producto de dos planos yuxtapuestos, uno compuesto por materia y otro asociado al espíritu (Newton, 1999, p. 397).

Es importante destacar que, esta idea está enmarcada en el contexto de la creencia generalizada en la época de Newton, en un “sensorio” o lugar de interacción entre materia y espíritu, donde estos podían comunicarse. Si bien los seres humanos no tienen la forma de observar el Sensorium Dei, para Newton era tan verídico como la materia misma (Figura 2-2).

Ahora, parece relevante preguntarse qué tiene que ver el inverso de la distancia al cuadrado

³Que actúa siempre en dirección que una los centros de las partículas.

con la intensidad de la fuerza, pues en realidad, esto conecta muy bien con el modelo newtoniano. Para entender mejor lo anterior, imagine la interacción gravitatoria, como agua que sale de una fuente; esta es análoga a la fuerza de gravedad producto de una masa.

El agua sale de la fuente a una tasa constante, al encontrarse en el vacío se extenderá por igual en todas direcciones formando una esfera; entonces, en un tiempo determinado, la fuente habrá llenado una esfera de radio (r), en ese momento, se podrá estimar la intensidad (i) con la que el agua fluye, pues podría calcularse por la cantidad de agua (k) que pasa por la superficie de la esfera. Esto se expresa como:

$$i = \left(\frac{k}{4\pi r^2} \right) \quad (2-1)$$

Si se espera un tiempo hasta que el agua llene una esfera de radio ($2r$) y nuevamente se mide su intensidad, notará que ahora tendrá que cubrir una superficie mayor, por lo que su intensidad disminuye.

$$i_2 = \frac{k}{4\pi(2r)^2} \quad (2-2)$$

Por consiguiente, cada vez que el agua cubra más y más espacio, su intensidad se reduce inversamente al cuadrado de la distancia a la fuente⁴. Si el espacio no estuviese vacío, es decir, existiera algún medio, esto podría influir en que cambie la intensidad de la fuente, de modo que ya no dependa del inverso de la distancia al cuadrado. Como resultado de todo lo anterior, para que una teoría física se pueda interpretar desde el modelo de acción a distancia, dicha teoría ha de poseer tres características importantes:

- El espacio en el que interactúan las magnitudes físicas (masas, cargas, entre otras.) debe ser vacío.⁵
- La interacción entre magnitudes debe darse entre fuerzas centrales y de forma instantánea.
- La intensidad de la fuerza central debe ser directamente proporcional al producto de las magnitudes e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa.

2.2. Argumentos en contra de la acción a distancia

La interpretación metafísica de la acción a distancia ha sido objeto de controversia desde la época de Newton. Uno de los principales argumentos en contra, es que viola el principio de causalidad física propuesto por Descartes, para él esto se reduce a una mirada puramente mecánica: “todo cambio es movimiento y toda alteración del movimiento se debe al contacto entre cuerpos” (Berkson, 2008, p. 44).

⁴En este ejemplo se uso dos tiempos distintos para comparar la intensidad de la fuente, sin embargo, en el modelo newtoniano toda interacción se da de forma instantánea.

⁵Vacío desde una perspectiva newtoniana.

Partiendo de lo anterior, se podría pensar que, si en la acción a distancia los cuerpos se encuentran separados por vacío, entonces ¿Cómo podría producirse movimiento sin contacto entre estos?

Otro científico que estaba en contra de la acción a distancia fue Gottfried Wilhelm Leibniz, quien discutía por correspondencia con el mismo Newton de forma indirecta⁶. En estas cartas, un tema central a debatir era el de la acción de los cuerpos. Así pues, Leibniz plantea que:

“Es necesario otra cosa más que la sola presencia para que una cosa represente aquello que ocurre en otra. Hace falta para eso alguna comunicación explicable, algún tipo de influencia, o de las cosas entre sí, o de una causa común” (Vailati, 1997, p. 58).

En otras palabras, para él la comunicación explicable, implica la existencia de un medio o un proceso a través del cual la información y la acción pueda transmitirse entre las cosas, a esta postura se le conoce como el principio de continuidad. Según Leibniz, todas las cosas en el universo están interconectadas y son parte de una armonía universal. Por lo tanto, cualquier cambio que comience en el mundo debe ser una continuación suave y gradual de lo que lo precede, sin cambios drásticos o discontinuidades bruscas. En ese sentido, le era inconcebible el hecho de que la sola existencia de una partícula le permitiese influir en otras de manera instantánea.

A pesar de que, para la filosofía natural, la acción a distancia tiene problemas para explicar los principios de causalidad y continuidad; es un hecho conocido que, fue uno de los principales modelos de interacción física, hasta mediados del siglo XIX.

2.3. Aceptación de la acción a distancia como modelo

Haciendo un análisis al prefacio de los principios de Newton, se puede llegar a interpretar que, su deseo esencialmente era poder explicar los fenómenos físicos, a partir de corpúsculos que componen la materia y, fuerzas centrales que interactúan de forma instantánea a distancia. (Newton, 1999, p. 382).

Existen varios puntos por los que se podría decir que el deseo de Newton fue de gran acogida para el mundo científico. En primer lugar, era innegable que la caracterización del espacio y el tiempo, junto con sus leyes mecánicas, son una descripción bastante precisa de los fenómenos gravitacionales, ya que, estas son aplicables a diferentes tipos de movimientos: por ejemplo, cuerpos que caen en la Tierra, el movimiento de los planetas, estrellas, satélites, etc.

En segundo lugar, la aceptación se da en un sentido teológico, pues podría considerarse una prueba de la existencia de Dios. A propósito, en una carta que Daniel Bernoulli hace a Leonard Euler escribe lo siguiente:

“No le puedo ocultar que en este punto soy un completo newtoniano, (...) si Dios pudo crear un alma cuya naturaleza es incomprendible, entonces podía imprimir una atracción universal a la materia, incluso si tal atracción está más allá de nuestra comprensión” (Henry, 2007, p.14).

⁶Se sabe esto gracias a un religioso llamado Clarke, quien recibía las cartas de Newton y las enviaba a Leibniz y viceversa, firmando con su nombre.

El anterior fragmento sugiere que, si la acción a distancia fuese comprobable, contribuiría a demostrar la influencia de un ser superior en el universo. En el contexto cultural del siglo XVIII era muy común creer en Dios, por ello, muchos científicos veían como más plausible el modelo de acción a distancia.

Por todo lo anterior, a pesar de que, a inicios del siglo XVIII ya existían estudios sobre electricidad, magnetismo, incluso óptica; lo más común es que sus explicaciones estuvieran basadas en la propuesta de la acción a distancia. Pocos científicos querían contradecirla, por el contrario, surgieron muchos trabajos en el intento de extenderla hacia otros fenómenos físicos. A continuación, se muestra su influencia en el estudio de la electricidad.

2.4. Acción a distancia en la electrostática

Uno de los primeros experimentos relacionados con el estudio de la electricidad, se atribuye a Tales de Mileto, filósofo griego, quien descubrió que, al frotar un trozo de ámbar con piel de animal, el ámbar podía atraer cierto tipo de objetos ligeros⁷. (Platón, 1999, p246). Por esta razón, durante mucho tiempo a este fenómeno se le llamó efecto ámbar; no fue sino hasta el siglo XVI, cuando el científico William Gilbert acuñó el término electricidad⁸.

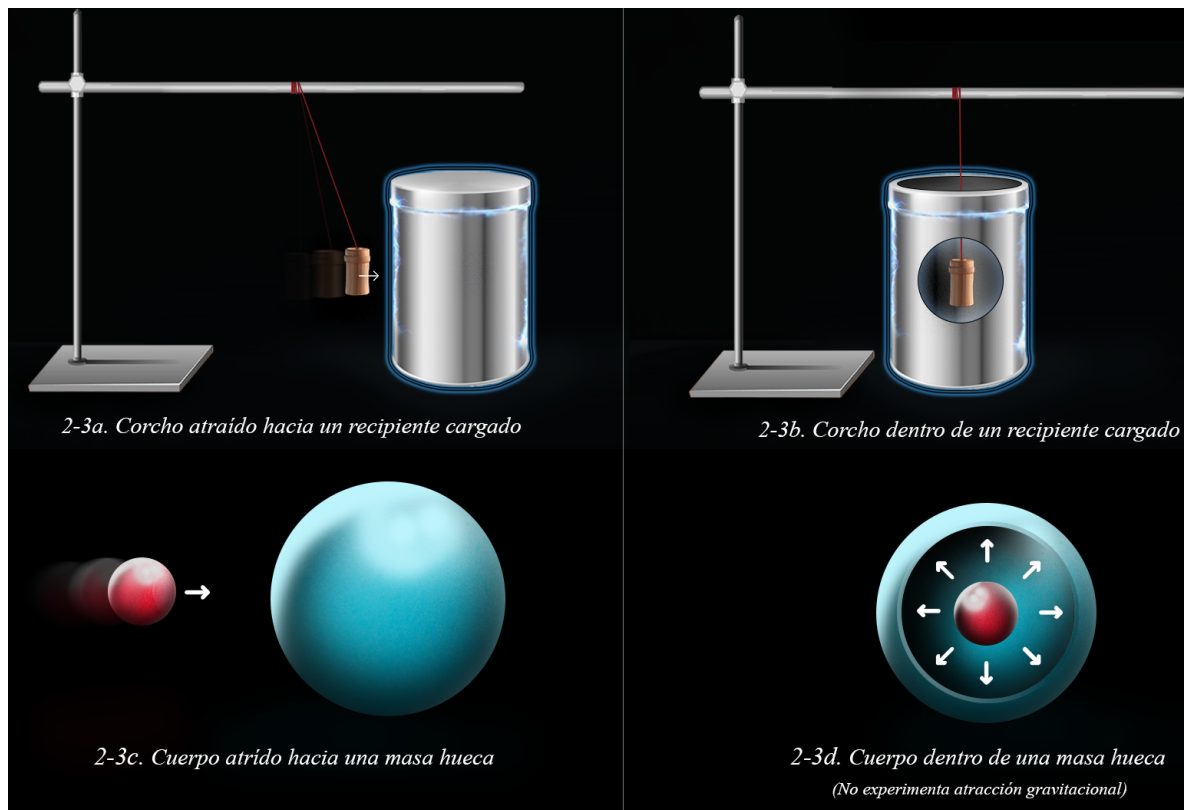


Figura 2-3.: Comparación entre el experimento de Franklin y la teoría de Newton. Elaboración propia.

⁷Plumas, cabellos etc.

⁸Esta palabra proviene del griego (elektron) que significa ámbar.

A partir de lo anterior, diferentes científicos se mostraron interesados en el estudio de la electricidad, entre ellos Benjamín Franklin, quien propone un modelo mecánico al respecto. Como resultado, plantea la existencia de un fluido, con la particularidad de transmitirse de un cuerpo a otro, cargándolos eléctricamente; además, con dicha transferencia, puede resultar el objeto cargado negativamente si presenta un déficit de fluido, por el contrario, si un cuerpo queda con exceso, entonces estará cargado positivamente. Esto da lugar a que cargas opuestas se atraigan, dado que, una compensará a la otra; mientras que, cargas iguales tienden a repelerse, buscando siempre un equilibrio eléctrico (Franklin, 2020, p.453).

Continuando con el estudio de la electricidad, Franklin realiza otro experimento, ubicó un corcho colgado de un hilo, cerca de un recipiente metálico cargado eléctricamente. Observó que, el corcho era atraído hacia el recipiente cargado, sin embargo, cuando introducía el corcho dentro del recipiente, parecía no experimentar ninguna atracción hacia las paredes (Figura 2-3).

Ante esta incógnita, Franklin solicitó a su amigo Joseph Priestley replicar este experimento; quien de manera ingeniosa recurrió a los Principia de Newton, al percatarse que este fenómeno presentaba similitudes con la gravedad. Priestley propuso que, si se consideraba una masa hueca, la suma de todas las fuerzas gravitacionales ejercidas por cada una de las partes sobre un objeto dentro de dicha masa sería igual a cero, de forma análoga al corcho dentro del recipiente. Por otra parte, en caso de que el objeto estuviera fuera de la masa hueca, la fuerza dependería del cuadrado de la distancia que los separa, de ahí que, se pueda apreciar la atracción del corcho hacia el recipiente (en anexos A-B podrá encontrar la respectiva demostración matemática).

Lo anterior muestra que, las leyes ya conocidas de la gravitación son retomadas por Priestley para explicar parcialmente un fenómeno eléctrico. No obstante, esto no se podía considerar una prueba directa de la relación entre gravedad y electricidad, pero de alguna manera anima a otros científicos a seguir haciendo nuevos experimentos al respecto.

Por su parte, un físico francés llamado Charles-Augustin de Coulomb, a finales del siglo XVIII, realizó una prueba experimental contundente a favor de lo que propuso Priestley, utilizando una balanza de torsión. Inicialmente, escogió una varilla de material aislante suspendida por un hilo en su centro, seguido, en los extremos de la varilla, colocó dos esferas cargadas eléctricamente, por último, depositó las esferas en una caja aislante para evitar interferencias, con el fin de que las cargas no pudiesen interactuar con su entorno. Como resultado, por efecto de la interacción eléctrica las esferas producen una torsión al hilo; y este a su vez, genera un ángulo de desplazamiento de la varilla.

Coulomb varió las magnitudes de las cargas en las esferas y midió la fuerza resultante, con los datos obtenidos comprobó que la fuerza con la que se atraen o repelen las cargas, si depende inversamente de la distancia al cuadrado, tal como lo propuso Priestley, además, postuló que dicha fuerza también depende del producto de sus cargas. Esto se conoce como la ley de atracción electrostática (2-3).

$$\vec{F}_e = \frac{1}{\varepsilon_0 4\pi} \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \hat{r} \quad (2-3)$$

$$\vec{F}_g = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \hat{r} \quad (2-4)$$

Para este momento, se tienen dos grandes teorías, la gravitacional de Newton y la electrostática propuesta por Coulomb, donde, en la primera se establece la existencia de partículas

con masa, mientras que, en la segunda, se tienen partículas cargadas. Resulta interesante precisar que, fenómenos distintos tengan una forma similar de ser expresados matemáticamente, pues si se analizan las ecuaciones (2-3) y (2-4), se logra apreciar que ambas fuerzas dependen de la distancia que separa los cuerpos⁹.

Resulta coherente pensar que Coulomb llevara el modelo de acción a distancia a la electrostática, esto implica que los fenómenos de cargas estáticas operen a distancia y de forma instantánea. Como se mencionó anteriormente, las posturas de Newton eran defendidas por gran parte de la comunidad científica, sin embargo, esta teoría no conseguía explicar todos los fenómenos eléctricos; sumado a esto, un nuevo experimento elaborado por Oersted llegó para traer nuevas incógnitas.

2.5. Acción a distancia en la electrodinámica

En el año 1820, el físico Danés Hans Cristian Oersted, se interesó en estudiar por qué los rayos producidos en las tormentas afectan las agujas de las brújulas¹⁰. Entonces, planteó un experimento donde utilizó un cable incandescente para simular un rayo, es así cómo descubrió que este cable lograba desviar un poco la aguja de la brújula. Posteriormente, para lograr un mayor efecto en la desviación de la aguja, uso otro cable, pero esta vez más grueso y no incandescente, con el ánimo de que transportara mayor corriente. Así descubrió que, la orientación de los polos en la aguja depende de la ubicación relativa entre el cable y la brújula.

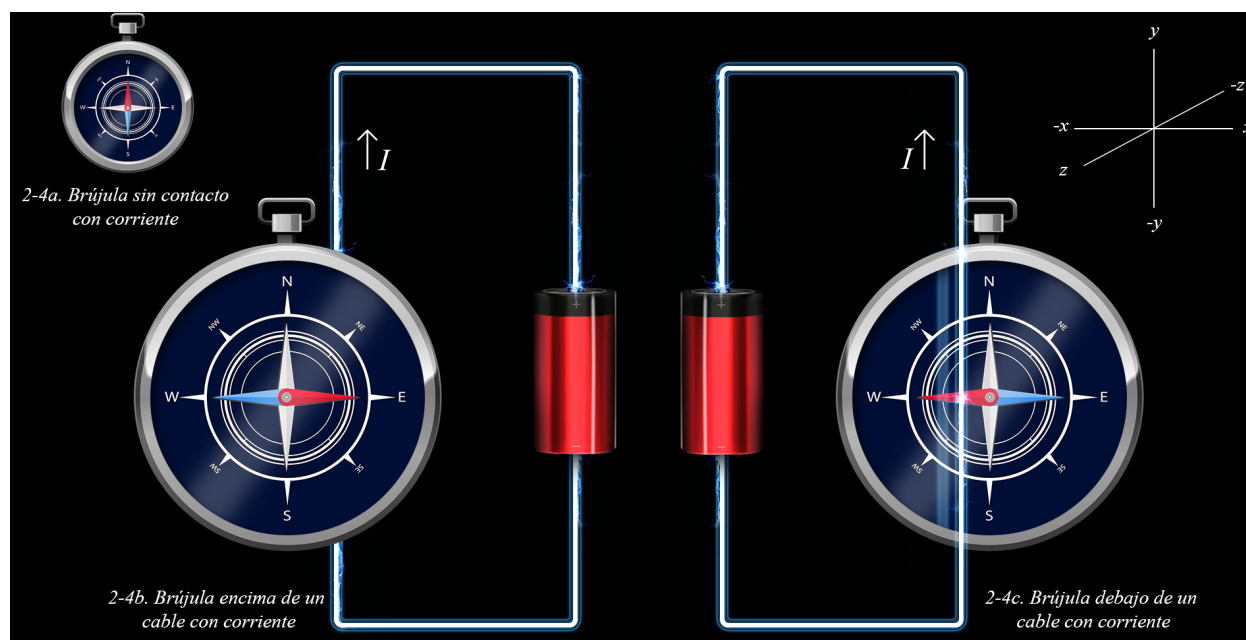


Figura 2-4.: Experimento de Oersted donde muestra los efectos de ubicar una brújula cerca de un cable por donde fluye corriente. Elaboración propia

Para entender cómo se afecta la aguja de la brújula en presencia de una corriente, considere

⁹A mayor distancia entre los cuerpos menor será la intensidad tanto de la fuerza eléctrica como la de gravitatoria.

¹⁰Para ese momento ya se consideraba los rayos como un caso particular de fenómeno eléctrico.

lo siguiente: Tal como se observa en la imagen 4b, si se ubica el cable conductor paralelo al eje y , entonces al poner la brújula en la parte positiva del eje z (encima del cable), el polo norte de la aguja apuntará en dirección positiva del eje x . Mientras que, si se sitúa la brújula en la parte negativa del eje z (debajo del cable), entonces el polo norte de la brújula apuntará en dirección negativa del eje x , como se aprecia en la imagen 2-4c¹¹.

A partir del experimento anterior, Oersted llega a dos conclusiones importantes: la primera, las fuerzas que afectan la brújula no son centrales, pues la aguja que marca la dirección de la fuerza apunta perpendicularmente al flujo de corriente. La segunda, fenómenos de naturaleza distinta pueden interactuar entre sí, este es el caso de la electricidad en el cable y el magnetismo de la brújula.

El experimento de Oersted fue de gran relevancia en el mundo científico, era de esperarse que llegara hasta la academia francesa, donde causó gran interés para Andrea Marie Ampere. Sin embargo, este no se encontraba conforme con las conclusiones a las que había llegado Oersted, pues creía que la interacción física solo se daba entre fenómenos de la misma naturaleza, por ejemplo, electricidad con electricidad y magnetismo con magnetismo. Además, Ampere era fiel seguidor de Newton, por lo que pensó que debería existir una justificación del movimiento de las agujas explicado por fuerzas centrales.

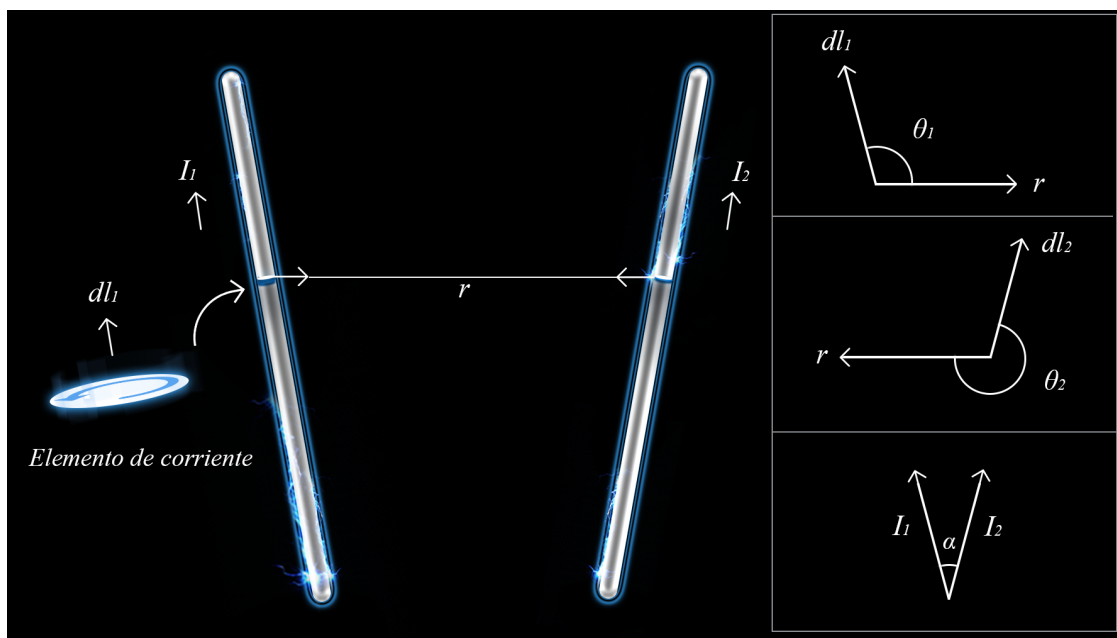


Figura 2-5.: Fuerza eléctrica entre dos elementos de corriente (Conductores cargados). Elaboración propia.

Por lo anterior, Ampere propuso una alternativa para explicar el experimento de Oersted, pero desde una perspectiva newtoniana. Esta alternativa plantea que, el magnetismo es un efecto producido por electricidad dinámica, además, que los imanes están compuestos por corrientes circulares de tamaño molecular denominados elementos de corriente. Estos se comportan de manera similar a las cargas estáticas de Coulomb, ya que pueden producir fuerzas centrales de atracción

¹¹Si se compara las imágenes 2 y 7, en la primera, la fuerza se dirige a favor del movimiento, mientras que en la segunda, la fuerza es perpendicular a la dirección de la corriente.

y repulsión, no obstante, en la teoría de Ampere las cargas se encuentran en movimiento (Hertz, 1990, p143).

Con el fin de comprobar su teoría, Ampere uso un cable por donde fluye corriente como un tipo de imán (electroimán). Entonces, colocó dos electroimanes paralelos, para simular la fuerza que se produce al tener dos imanes cerca. Con ello, descubrió que, si las corrientes fluyen en el mismo sentido, los cables adquieren una fuerza atractiva, mientras que, si fluyen en sentidos opuestos, estos experimentan fuerzas repulsivas.

Con base en lo anterior, Ampere presentó una relación analítica expresada en la ecuación (5), en la cual los elementos de corriente son expresados como $(i \cdot dl)$ donde dl representa una parte infinitesimal de longitud del cable conductor, e i la corriente que circula en dl (Hertz, 1990, p144).

$$\vec{F}_e = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{i_1 dl_1 \cdot i_2 dl_2}{r^2} \left(\cos(\alpha) - \frac{3}{2} \cos(\theta_1) \cos(\theta_2) \right) \hat{r} \quad (2-5)$$

Vale la pena resaltar el esfuerzo de Ampere por hacer una ecuación similar a la ley gravitacional de Newton: en primer lugar, propone el producto entre elementos de corriente ($i_1 dl_1 \cdot i_2 dl_2$), de manera análoga al producto entre masas. En segundo lugar, la fuerza también depende del inverso al cuadrado de la distancia (r) que los separa, pero se distancia levemente de Newton, al verse en la necesidad de usar otro término más en la ecuación. Este está relacionado con los ángulos θ_1 y θ_2 , ubicados entre cada elemento de corriente respecto a la distancia r que los separa; además, añade un ángulo α que se da entre las direcciones por donde fluye la corriente de los electroimanes (Figura 2-5).

Aunque estos ángulos, representen una ligera desviación respecto a la tercera característica del modelo de interacción newtoniano¹², esto no impide que se pueda situar la teoría de Ampere desde una postura a favor de la acción a distancia, pues cumple con la condición básica de poseer fuerzas centrales que actúan de manera instantánea en el vacío, en este caso la fuerza eléctrica entre elementos de corriente.

La teoría de Ampere logra explicar de forma muy acertada cómo se comportan las corrientes cuando interactúan, hasta la actualidad se sigue usando una ecuación similar¹³. Sin embargo, su teoría carecía de una explicación para los fenómenos electrostáticos, sumado a esto, diferentes estudios del experimento de Oersted llevaron a un nuevo tipo de fenómeno físico llamado inducción electromagnética.

2.6. Acción a distancia en la inducción electromagnética

Así como Ampere se vio interesado en el experimento de Oersted, otros físicos también lo hicieron, entre estos Michael Faraday, quien llevó aún más lejos la relación que tiene el magnetismo con la electricidad, (en el próximo capítulo se expone cómo Faraday consigue llegar a la inducción electromagnética). Sin embargo, para darle una interpretación a la inducción desde la acción a distancia, basta con saber que, un aspecto de esta se refiere a que, una corriente en un cable

¹²Ver inciso 2.1 modelo de acción a distancia.

¹³Se le conoce como ley de ampere que fue ampliada por Maxwell en su notación diferencial, utilizando el campo magnético.

estacionario puede inducir una corriente en otro cable estacionario, solo mientras la corriente en el primero cambie en el tiempo.

Con el avance en el estudio de la electricidad, gran parte de los científicos se interesaron en buscar una teoría o ley que explicase tanto los fenómenos electrostáticos como los electrodinámicos, sumado a esto, la teoría también debería explicar los fenómenos relacionados con la inducción. Una de las figuras más importantes, que se dispuso a esta tarea, fue el alemán Wilhelm Weber.

La primera parte de su tarea radica en tratar de unificar la ecuación de Coulomb con la de Ampere, lo cual presentó dificultades, ya que Coulomb había determinado que cargas iguales se repelen y cargas opuestas se atraen, mientras que, como se vio en el apartado anterior, Ampere, con sus experimentos encontró que corrientes que fluyen en el mismo sentido se atraen, mientras que, si fluyen en sentidos opuestos se repelen. Para conciliar esto, Weber interpretó que la corriente eléctrica era producto de cargas opuestas que viajaban en sentidos contrarios. De esta manera, introduce por primera vez la idea de elementos de corriente positivos y negativos que se transportan en los conductores.

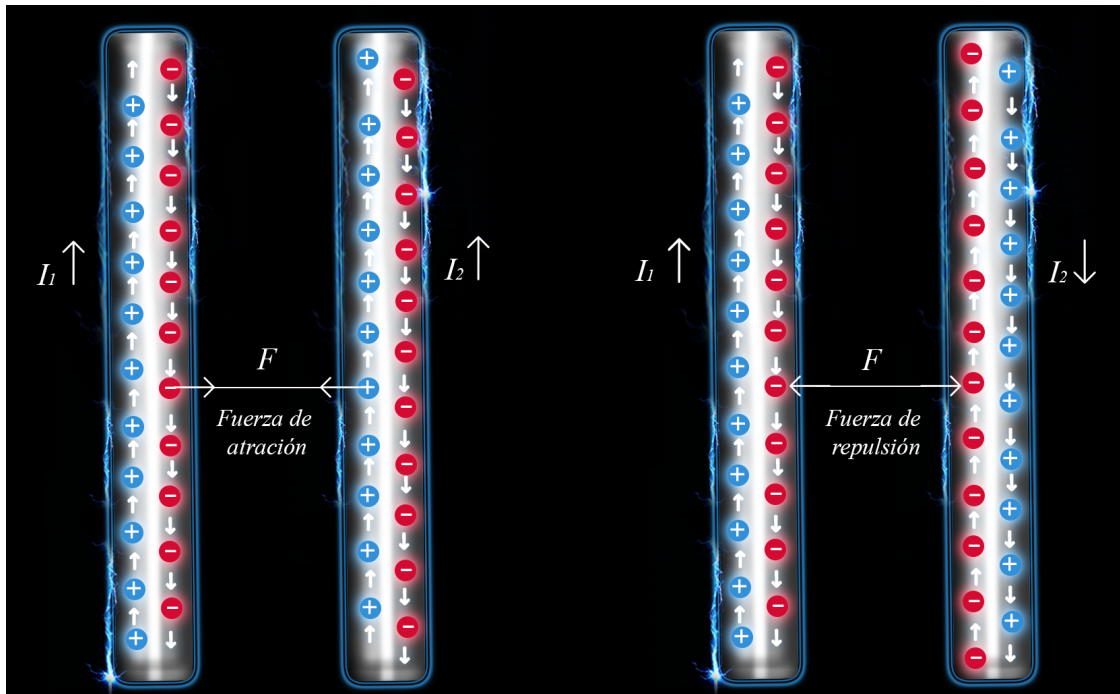


Figura 2-6.: Fuerza eléctrica entre corrientes desde la teoría de Weber. Elaboración propia.

Como se puede ver en la Figura 2-6, con esta interpretación Weber consigue que cargas iguales se sigan repeliendo, mientras que, corrientes en el mismo sentido se atraigan. De la misma forma, cargas distintas se atraen, en tanto que, corrientes en direcciones opuestas se repelen. Con estos presupuestos teóricos, Weber se dispone a crear una formulación matemática y postula “La ley básica general de la acción eléctrica” (ecuación 2-7):

Weber construye esta ley partiendo de las ecuaciones de Coulomb y Ampere. Con el objetivo de proporcionar un enfoque más accesible para su formulación, es posible abordar esta ley utilizando

las ecuaciones de Lagrange (ver anexo C-demostración)¹⁴. En principio se define el potencial generalizado:

$$U = \frac{Q_1 Q_2}{\varepsilon_0 4\pi} \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{c^2} \frac{(\dot{r})^2}{r} \right) \quad (2-6)$$

El primer término, surge a partir de la ley electrostática de Coulomb (ecuación 2-3) expresada en forma de potencial eléctrico, donde $U = - \int \vec{F} \cdot d\vec{r}$.

Para el segundo término del potencial, que viene dado por la ley de Ampere (ecuación 2-4), θ_1 y θ_2 serán igual a $\pi/2$ y α será igual a 0. Esto quiere decir que, se tiene dos elementos de corriente paralelos y, como Weber considera los elementos de corriente como cargas que se mueven en sentidos opuestos con una misma velocidad, se tiene que $i_1 dl_1 = Q_1 \dot{r}$ y $i_2 dl_2 = Q_2 \dot{r}$ aplicando a la ecuación de Ampere se obtiene el segundo término del potencial. Finalmente, al aplicar las ecuaciones de la fuerza generalizada a (ecuación 2-6) se obtiene la ley básica general de la acción eléctrica propuesta por Weber.

Donde la constante c establece la relación entre el número de unidades electrostáticas de carga, la intensidad de corriente y el tiempo. Aunque en la época de Weber no se conocía la relación analítica entre el electromagnetismo y la luz, esta relación estaba implícita en la ecuación, pues la constante (c) resulta ser igual a la velocidad de la luz multiplicada por la raíz cuadrada de dos: $c^2 = \frac{2}{\mu_0 \varepsilon_0}$

$$\vec{F}_e = \frac{1}{\varepsilon_0 4\pi} \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \left[1 - \frac{1}{c^2} \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 + \frac{2r}{c^2} \frac{d^2 r}{dt^2} \right] \hat{r} \quad (2-7)$$

En este sentido, la ley de Weber consigue brindar una explicación aceptable tanto para la electrostática, como para la electrodinámica. Además, logra explicar la inducción entre corrientes a partir del tercer término añadido en la ecuación (2-7), la cual introduce la aceleración entre cargas, esto debido al incremento o disminución en la intensidad de dicha corriente. De hecho, es posible llegar a la ley de inducción de Faraday- Lenz desde la ecuación de Weber, para ello se usa el siguiente vector potencial magnético (\vec{A}) (ver anexo D - demostración):

$$\vec{A} = \frac{\mu_0}{4\pi} I_1 \oint_{c1} \left(\frac{d\vec{l}_1}{r} \right)$$

Donde \vec{A} se relaciona con las ecuaciones de Maxwell, pues el campo magnético puede ser expresado por $\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A}$. Por consiguiente, la fuerza electromotriz queda expresada así:

$$fem = - \frac{d}{dt} \left(\oint_{c1} \vec{A} \cdot d\vec{l}_2 \right) \quad (2-8)$$

¹⁴En el anexo c, se encuentra detallada la demostración matemática. Es importante aclarar que, es una demostración propia inspirada en la teoría de Weber.

Notará que, al cambiar \vec{A} por el campo magnético usando el teorema de Stokes se obtiene:

$$f_{em} = -\frac{d}{dt} \left(\int_s \vec{B} \cdot d\vec{s} \right) = -\frac{d\Phi_B}{dt} \quad (2-9)$$

Este resultado es de gran importancia, pues implica que los fenómenos de inducción electromagnética pueden ser analizados desde la ley general de Weber.

Teniendo en cuenta lo anterior, es posible afirmar que, el objetivo de Weber fue crear una teoría general del electromagnetismo, ya que, “publicó su ley de la fuerza en 1846, unificando la fuerza de Coulomb entre partículas eléctricas, la fuerza de Amperé entre elementos de corrientes y la ley de inducción de Faraday” (Torres, 2021, p.9). Adicionalmente, la teoría de Weber cumple con la ley de acción y reacción newtoniana, la conservación de la energía, del momento lineal y momento angular.

La importancia de dicha ley fue tal que, el propio Maxwell dedicó el último capítulo de su libro más importante¹⁵ a presentar la electrodinámica de Weber, con el fin de mostrar su compatibilidad con los principales descubrimientos del electromagnetismo, conocidos hasta ese momento.

Por otro lado, la interacción en la ley de Weber cumple con las características necesarias para satisfacer el modelo de acción a distancia, pues la fuerza entre cargas es central y se da de forma instantánea. Además, como se aprecia en la ecuación (2-7), dicha fuerza es proporcional al producto de sus cargas y al inverso de la distancia al cuadrado que las separa.

Esta ley, llevó a lo más alto el modelo de interacción newtoniano, puesto que, durante el tiempo en el cual estuvo aceptada gozaba de gran prestigio. Incluso se llegó a pensar que, las consideraciones añadidas por Weber sobre cargas aceleradas se podrían aplicar a masas, modificando las ecuaciones de gravitación de Newton, con el objetivo de solucionar el problema con el perihelio de Mercurio (Leiva, 2022, p 21).

En el inciso 2.3, se mencionó las bases por las cuales el deseo de Newton fue de gran acogida, desde Presley, Coulomb y Ampere, hasta Weber, se dedicaron a conservar y desarrollar el modelo de interacción newtoniano, consiguiendo así, avances significativos en la ciencia. Por supuesto, los anteriores no fueron los únicos en aportar a favor de dicho modelo, se encuentran también las contribuciones de Poisson y los potenciales de Neuman, entre otros. No obstante, este no fue el único modelo capaz de describir y explicar las interacciones electromagnéticas, a continuación, se expondrá una alternativa al modelo de acción a distancia.

¹⁵(A treatise on electricity and magnetism Vol II)

3. Interacción electromagnética debida al campo

El concepto de campo es sin duda una de las construcciones humanas más estudiadas en la rama de la física, modela la gran mayoría de teorías modernas, tales como relatividad y mecánica cuántica, además, permite explicar fenómenos desde un punto de vista coherente. Sin embargo, no es sencillo dar una justificación completa y rigurosa de qué se entiende como campo. A todo esto, ¿Qué es el campo?¹.

La anterior pregunta se puede abordar desde varias aristas, no obstante, en el presente apartado, se hace énfasis en construir el concepto a partir de las interacciones físicas, en específico las electromagnéticas.

Ahora bien, es preciso establecer que, la interacción física se refiere a la relación entre dos o más cuerpos que involucran cambios o efectos mutuos. Esto sucede por medio de movimientos, fuerzas, cambios de energía o cualquier forma de conexión perceptible o medible en el entorno físico. La interacción puede manifestarse por medio de distintos fenómenos, como la transferencia de energía, la colisión, la fricción, la acción y reacción, entre otros.

Para empezar a hilar el concepto de campo, es conveniente resaltar el papel que desempeñó, el físico inglés Michael Faraday a quien comúnmente se le atribuye la noción de campo en electromagnetismo. Desde temprana edad trabajó en una biblioteca encuadernando libros; allí se mostró interesado en la ciencia y las incógnitas que esta plantea, por ejemplo: ¿por qué un cuerpo empuja a otro en vez de penetrar en él?, ¿por qué un imán es capaz de hacer que un trozo de hierro a cierta distancia se mueva?, ¿cómo es posible que un cuerpo electrizado haga que el polvo metálico se mueva hacia él?... Todas estas preguntas guardan relación en cuanto a que intentan responder, ¿cómo interactúan los cuerpos? (Berkson, 2008, p. 18).

Lo más común en tiempos de Faraday, es que los interrogantes anteriores fuesen interpretados desde la acción a distancia newtoniana, sin embargo, él no estaba de acuerdo con la idea de que cuerpos separados por vacío² pudiesen interactuar entre sí; desde su perspectiva, estas incógnitas seguían sin tener una respuesta definitiva.

Aunque el modelo newtoniano estuviese en auge, Faraday se inclinó por una perspectiva que ya existía antes de Newton: el modelo de interacción propuesto inicialmente por Descartes y complementado posteriormente por Leibniz.

¹Es importante aclarar que en esta sección se realiza un bosquejo general de las ideas principales sobre el campo, explicar detalladamente cómo se construye esta noción requeriría toda una investigación dedicada.

²Vacío, según la visión newtoniana.

3.1. René Descartes y Gottfried Leibniz

René Descartes es considerado el padre de la filosofía moderna y el racionalismo, su influencia fue tal que, grandes científicos como Leibniz y Newton se inspiraron en muchas de sus ideas. Ya retirado, en 1644 publica los principios de la filosofía, donde pretende exponer en conjunto su pensamiento, tanto en física como metafísica, además de intentar introducir su filosofía en las escuelas.

En la obra mencionada anteriormente, Descartes hace una aproximación de lo que considera materia física. En principio, retoma algunas consideraciones propuestas por los griegos y plantea que los cuerpos se componen de dos propiedades fundamentales, la extensión y el movimiento: son fundamentales por el hecho de que pueden explicar todo el mundo físico, sin que se puedan derivar de otra cosa más que de Dios

3.1.1. Sobre la extensión

Para Descartes, la extensión es una propiedad inherente a los cuerpos, se refiere a la capacidad de ocupar un espacio, es decir, tener dimensiones como altura, anchura y profundidad; de esta se derivan propiedades secundarias como el color, la dureza, el peso, entre otras.

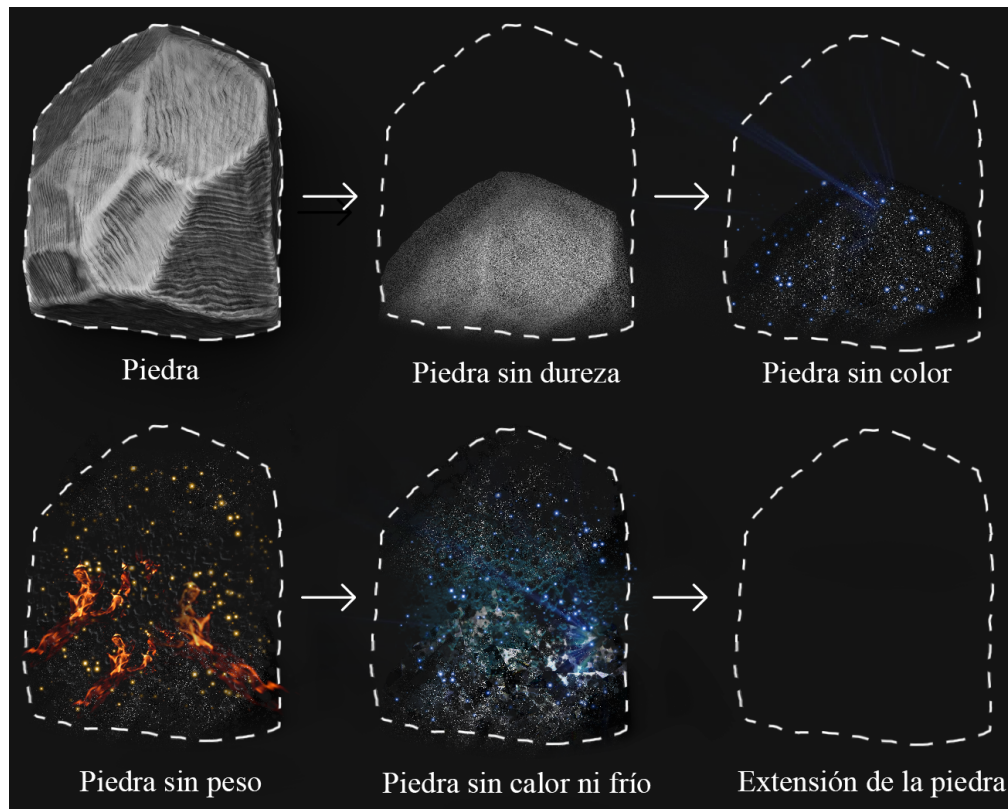


Figura 3-1.: Ejemplo cartesiano de las propiedades secundarias en la piedra y la extensión como propiedad última. Elaboración propia.

Este filósofo plantea que, la misma extensión que constituye la naturaleza del cuerpo, constituye la naturaleza del espacio, estos dos no difieren entre sí. Para comprender mejor esta idea, Descartes propone un ejemplo, donde se tiene en cuenta una piedra y se retira de ella una a una sus propiedades secundarias:

Quitemos, en primer lugar, la dureza, puesto que si pulverizamos esta piedra, perdería su dureza y, por ello, no dejaría de ser cuerpo; quitémosle también el color, puesto que hemos visto en ocasiones piedras tan transparentes que no tenían color; quitémosle también el peso, pues vemos que el fuego, aun cuando sea muy ligero, no deja de ser considerado cuerpo; quitémosle el frío, el calor y todas las otras cualidades de este género, puesto que no pensamos que estén en la piedra, o puesto que no pensamos que esta piedra cambie de naturaleza porque nos parece en unos momentos fría y en otros caliente (imagen **3-1**) . (Descartes, 1997, p 78)

Según lo anterior, una vez se quitan todas las propiedades secundarias de la piedra, lo último que queda es su extensión, es decir, el lugar que ocupaba en un principio la piedra.

Si se piensa en un proceso inverso, donde se toma una parte de extensión y se va agregando una a una las propiedades secundarias que conforman la roca, como resultado se obtendrá la misma piedra del ejemplo. Partiendo de esto, se puede resaltar que, la materia y el espacio en esencia se conforman de lo mismo, pues ambos se componen de extensión, por lo tanto, solo difieren en cuanto a las propiedades secundarias que se asocian a cada uno. De todo esto, Descartes concluye que no existe cosa como el vacío, pues es simple extensión a la que se le han quitado sus propiedades secundarias.

3.1.2. Sobre el movimiento

Por otro lado, Descartes propone que cada cuerpo tiene una cantidad inherente e invariable llamada “*ímpetu*”³ ; este determina la velocidad y dirección del movimiento. Por consiguiente, él creía que la materia en reposo tiene una tendencia natural a permanecer en reposo, mientras que, la materia en movimiento, una tendencia natural a seguir moviéndose en línea recta a una velocidad constante.

Cuando los cuerpos en movimiento entran en contacto se transmiten mutuamente el ímpetu, de manera que, este jamás se pierde si no que se conserva. Esto significa que, Descartes concebía el movimiento como una propiedad fundamental de la materia, en lugar de ser causado por alguna fuerza externa. De tal forma que, un ímpetu inicial⁴ y múltiples colisiones, causarían el movimiento de todas las cosas que se perciben.

Teniendo en cuenta lo anterior, cuando los cuerpos entran en contacto es fácil entender cómo se produce el movimiento, dado que, se transmiten entre sí el ímpetu. Sin embargo, cabe preguntar ¿cómo podría explicarse el hecho que objetos que no estén aparentemente en contacto se muevan?, por ejemplo, los planetas respecto al Sol. Para responder este interrogante, Descartes afirma que:

Los cielos transportan consigo toda la materia que contienen: se equivocan al imaginar los cielos como un espacio enteramente vacío... Pienso así, pues no sólo tal vacío no

³También se le conoce como cantidad de movimiento

⁴Causado por Dios

puede existir en la naturaleza, si no que la materia del cielo es líquida, esto da lugar a que arrastren consigo todos los cuerpos que abarcan y rodean por todos los lados, siempre que alguna causa externa no impida su arrastre, aunque estos cuerpos se encuentren en completo reposo, sean duros o sólidos (Descartes, 1997, p 133).

En otras palabras, Descartes explica el movimiento de los planetas al imaginarse un líquido, en el cual se encuentra toda la materia visible; este líquido está sometido a vórtices⁵ que producen movimientos circulares. Para aclarar mejor esto conviene imaginar lo siguiente:

Para simular la traslación de los planetas alrededor del Sol, se tiene un recipiente lleno de agua, en el cual se encuentran pequeñas esferas de hielo, éstas al ser menos densas que el agua, flotarán. Seguido, si se agita el agua en círculos, de tal forma que se genere un vórtice, es posible notar que las esferas empezaran a rotar alrededor del centro del vórtice, tal como lo hacen los planetas respecto al Sol. Observe que, las esferas de hielo cumplen un papel importante en el ejemplo, ya que el agua y el hielo son una misma sustancia en diferentes estados, de manera análoga a lo que propone Descartes, cuando menciona que la materia y el espacio son, en esencia extensión con distintas propiedades secundarias.

De manera que, la acción de un cuerpo a otro se sigue dando por contacto entre cuerpos contiguos. En el ejemplo anterior, las esferas se mueven por el contacto con el agua, y esto es posible porque tanto el agua como el hielo son cuerpos; dicho en palabras de Descartes: La traslación del cuerpo se produce desde la vecindad de aquellos con los que está en contacto (Descartes, 1997, p 90).

Existen varios aspectos por los que, la descripción de la materia y el movimiento de Descartes pueda resultar compleja, por ejemplo, es difícil explicar desde la teoría de los vórtices los distintos tipos de periodos que tienen los planetas o la casi nula traslación de las estrellas respecto a la tierra. No obstante, se resalta esta descripción, ya que, fue pionera en su tiempo y sirvió de base para futuras interpretaciones del mundo físico. En resumen, la interpretación cartesiana respecto a las interacciones físicas se da a partir de lo que él denominó ímpetu (cantidad que se conserva y se trasmite por contacto contiguo entre cuerpos), además, se calcula con el producto de la masa del cuerpo y su velocidad. En lo que se refiere a objetos que se encuentren a cierta distancia, como la Tierra respecto a los demás astros, el movimiento se genera a través de vórtices.

3.1.3. Sobre la fuerza

En definitiva, la visión cartesiana de la materia fue relevante en la mayor parte del mundo científico, incluso llegó a manos de Gottfried Leibniz, físico natural alemán, considerado como el último genio universal, dado que tenía formación en múltiples disciplinas. Este físico, al estudiar los postulados de Descartes llega a criticar su teoría, pues pensaba que esta no explicaba la impenetrabilidad⁶ de la materia:

Leibniz atacó a Descartes en un problema clave de la teoría física, el cual se centra en la cuestión: ¿Cómo interactúan dos cuerpos sólidos? Descartes había basado todo su sistema en la interacción de las partículas por contacto de sus superficies. Pero ¿Por

⁵Un vórtice es un flujo turbulento, en rotación alrededor de un eje cuyas trayectorias de corriente son circulares cerradas o helicoidales abiertas.

⁶Se refiere a la propiedad de los cuerpos que impide que uno ocupe el lugar de otro.

qué – preguntaba Leibniz- las superficies son resistentes a la penetración? Si son objetos meramente geométricos, ¿Por qué no se atraviesan, como podemos imaginar qué sucede con los objetos geométricos? (Berkson, 2018, p45).

Primero, es importante aclarar que, cuando se habla de objeto geométrico, Leibniz se refiere a la extensión; así rescribiendo la pregunta anterior resulta que, si los cuerpos no son más que extensión, ¿por qué no se atraviesan cuando chocan? Ahora bien, se podría pensar que no se atraviesan debido a la dureza de los cuerpos, como la dureza de la roca mencionada más arriba, pero recuerde que, al quitarle la dureza a la roca esta seguía siendo un cuerpo que poseía extensión y movimiento, por lo tanto, no existe razón para que, al chocar con otro cuerpo, de la misma naturaleza, impida penetrarse. Según esto, las preguntas planteadas por Leibniz no tenían solución dentro del sistema de Descartes.

Para dar una solución convincente a esto, Leibniz reconoció extensión y movimiento como propiedades fundamentales de la materia, no obstante, añadió lo que él denominó *fuerza primitiva*, como tercera propiedad inherente a los cuerpos, la cual debe ser de naturaleza repulsiva para evitar que los cuerpos se atravesen entre sí. Así pues, cuando dos cuerpos chocan, no necesariamente son penetrados, pues gracias a la fuerza que es inherente a cada cuerpo se repelen. Con todo esto, Leibniz pensaba que, la materia se puede distinguir como una sustancia continua, con puntos de fuerza distribuidos infinitamente a lo largo de ella. (Vailati, 1997, p.79)

Cabe mencionar que, existieron varios filósofos que desarrollaron interpretaciones del mundo similares a las de Descartes y Leibniz, cada una con sus ventajas y desventajas. Por ejemplo, Boscovich en 1758 desarrolló una teoría atómica partiendo de las fuerzas de repulsión propuestas por Leibniz, sin embargo, incluye parte de la acción a distancia newtoniana, ya que, para él existe un equilibrio entre fuerzas de atracción a distancia y de repulsión por contacto.

Continuando por la misma línea de pensamiento, el filósofo Immanuel Kant razonaba que:

Un cuerpo material es una región continua de fuerzas puntuales rodeada por un espacio vacío. Asociadas a cada punto del cuerpo hay fuerzas tanto atractivas como repulsivas. Cada punto repele a los que entran en contacto con él debido a las fuerzas repulsivas y, por tanto, el cuerpo tiende a dilatarse (Berkson, 2008, p47).

Del pensamiento de Kant sobre la materia, Oersted deduce que, si los cuerpos están conformados por fuerzas atractivas y repulsivas, entonces lo que se observa cuando dos imanes se atraen, o dos cargas eléctricas se repelen, no es más que manifestaciones de esas fuerzas atractivas y repulsivas; concluyendo que se trata en sí, no de diferentes fuerzas, sino de una especie de fuerza de la misma naturaleza. Por consiguiente, cabe la posibilidad de que fuerzas eléctricas y magnéticas junto con las gravitacionales, puedan de alguna forma manifestarse interactuando entre sí.

En resumen; las ideas expuestas en el apartado (3.1) son clave en torno al desarrollo del modelo de campo: por una parte, Descartes, en cuanto a extensión y movimiento; Leibnitz, quien se refiere a la fuerza como propiedad fundamental y, nuevamente Oersted, al relacionar distintos tipos de interacciones físicas en una sola, de naturaleza atractiva y repulsiva.

Como se mencionó en el capítulo anterior, después del siglo XVIII la física tuvo avances significativos: la teoría gravitatoria de Newton, experimentos nuevos como los de Franklin, Coulomb, Ampere, entre otros. De manera que, el ámbito científico era un nido de nuevas ideas y teorías que querían dar explicación a todo lo relacionado con fenómenos físicos. En este contexto, nace quien

edifica el modelo de campo, el cual va a renovar la forma en que se entendían las interacciones físicas hasta entonces.

3.2. Michael Faraday

En el presente documento se ha mencionado varias veces el nombre de Michael Faraday, dado que es uno de los protagonistas en el desarrollo y avance de la ciencia y el concepto de campo. Faraday nació en una familia humilde, un 22 de septiembre de 1791 en Inglaterra; cuando tenía catorce años consiguió un trabajo encuadernando libros, de este modo, sin estudios previos se llenaba la cabeza de ideas leyendo en las noches, esto generó en él gran curiosidad por el mundo.

Cuando tuvo oportunidad, asistió a las conferencias que daba el gran químico de renombre Humphry Davy en la Royal Institution, allí tomó nota de cada una de las charlas que escuchaba. En una ocasión, Faraday le hizo llegar todas sus notas a Humphrey, lo que logró que este se impresionara y le ofreciera un empleo como asistente de su laboratorio.

Tiempo después, mientras Faraday trabajaba para Humphrey llegó la noticia del nuevo experimento de Oersted junto con las explicaciones de Ampere (ver apartado 2.6). Teniendo en cuenta lo innovador de estos experimentos, gran parte del ámbito científico se mostró interesado, al igual que Faraday, quien para este entonces contaba con grandes habilidades experimentales.

3.2.1. Rotaciones electromagnéticas

Faraday conocía bien el modelo de acción a distancia newtoniano, pero también había leído otros modelos como el de Descartes y Leibniz, junto con las consideraciones de Kant y Bosovich. Con su propia interpretación del mundo, este físico experimental creía que la acción a distancia era un modelo insuficiente para explicar hechos relacionados a cómo actúan los cuerpos, por ejemplo, no le convenía que, un imán pudiera atraer o repeler a otro a distancia en el vacío, ni tampoco el hecho que, las fuerzas siempre fueran centrales como lo postula Ampere en su teoría de corrientes. Así, por medio de experimentos trata de construir su propia interpretación de los fenómenos eléctricos y magnéticos.

En el año 1821, Faraday replicó el experimento de Oersted varias veces. En una de ellas acercó un imán a un cable con corriente, el cual se encontraba suspendido horizontalmente y se sostenía en el centro permitiéndole girar. Al observar el experimento, le llamó la atención que, al intentar unir un polo del imán con un extremo del cable, este giraba formando círculos (como la hélice de un helicóptero). Con esta idea en mente, intentó hacer rotar el cable de forma permanente, para ello realizó el siguiente experimento:

En primer lugar, suspendió un alambre verticalmente (similar a un péndulo, pero con libertad de giro), de manera que, el otro extremo del alambre se encuentra parcialmente sumergido en un recipiente con mercurio. En el fondo de dicho recipiente, fijó en el centro un imán en forma de barra vertical, de modo que, uno de los polos sobresalía del mercurio (ver imagen **3-2a**). Seguido, acopló una fuente eléctrica formando un circuito: por un lado, conecta una terminal al mercurio y la otra terminal, al extremo fijo del alambre. Una vez cerrado el circuito, el alambre empezaba a girar formando círculos continuos, teniendo como centro el polo magnético expuesto del imán.

Al analizar con detalle lo sucedido en el experimento, Faraday observa que, la atracción entre el imán y el alambre no es de forma central, como lo postula la teoría de Ampere, sino que el movimiento circular es consecuencia de una fuerza perpendicular entre estos. De este modo, guiado por la idea leibniziana de establecer la fuerza como propiedad inherente a la materia, Faraday introduce las líneas de fuerza para explicar la interacción entre el alambre y el imán.

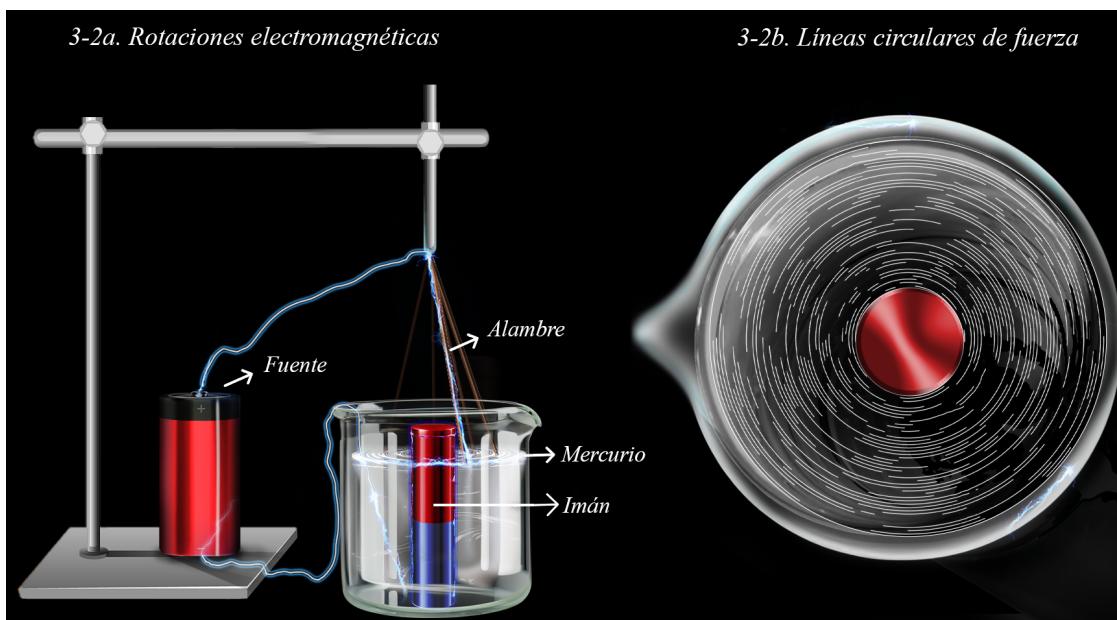


Figura 3-2.: Experimento rotaciones electromagnéticas e imagen de las líneas de fuerza que produce el polo del imán Elaboración propia.

Dichas líneas de fuerza salen y entran de los imanes representando la intensidad y dirección de las interacciones magnéticas. Así pues, la disposición del imán en el experimento genera que, el alambre se encuentre rodeado por líneas circulares de fuerza (ver imagen 3-2b). Al conectar la batería, el alambre se transforma en un electroimán, lo que implica que ya pueda interactuar con el imán. Por la propia disposición de las líneas de fuerza, se explica por qué no se genera una atracción central si no perpendicular entre los imanes.

Faraday se inclina a pensar que, las líneas de fuerza pueden ser una explicación coherente para las interacciones físicas, haciendo referencia a que estas líneas pueden transportar la acción de un cuerpo a otro, permitiendo que el electroimán sea influido por el imán.

El experimento anteriormente descrito, es conocido como *rotaciones electromagnéticas*, considerado el precursor de lo que hoy en día se conoce como motor eléctrico. Por consiguiente, gracias a este y otros trabajos empíricos, Faraday adquirió gran renombre como físico experimental.

3.2.2. Inducción electromagnética

Resulta relevante mencionar que, Faraday comparte la idea de Oersted, en el sentido que, fenómenos como el magnetismo y la electricidad podrían ser en realidad de la misma naturaleza. Oersted ya había demostrado como una corriente eléctrica generaba efectos magnéticos; ahora bien,

Faraday se propone encontrar la forma de generar una corriente eléctrica, a partir de algún tipo de fenómeno magnético.

En el año 1831, Faraday realiza uno de los experimentos más importantes en la historia de la física, para ello utilizó un anillo de hierro al cual enrolló dos bobinados en los extremos (ver imagen **3-3**), configurando dos circuitos independientes: en el primero, enlazó el bobinado a una batería para generar un electroimán, capaz de producir una alta tensión magnética. Posteriormente, lo conectó a un interruptor, para abrir y cerrar el paso de corriente. En el lado opuesto del anillo, ubicó el segundo bobinado acoplado a un galvanómetro, de tal forma que, la corriente en el primer circuito no pase al segundo.

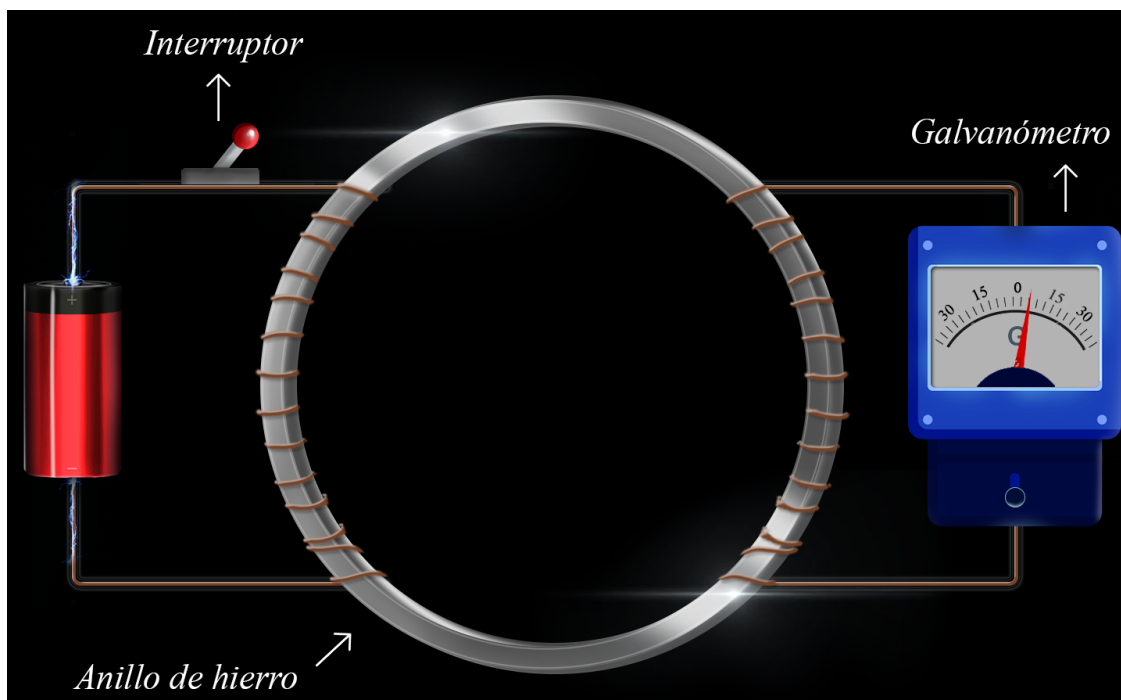


Figura 3-3.: Primer experimento sobre inducción electromagnética, anillo de hierro. Elaboración propia.

Luego, al cerrar el interruptor y permitir el flujo de corriente en el bobinado, Faraday notó que, en el circuito secundario, el galvanómetro marcaba por un instante de tiempo una corriente eléctrica. Por otro lado, al abrir el interruptor, observó que, el galvanómetro nuevamente detecta una corriente eléctrica en sentido opuesto; a este fenómeno se le denominó inducción electromagnética. De este modo, logró su propósito de generar electricidad a partir de magnetismo.

Al observar los resultados, Faraday se plantea si el anillo de hierro es necesario para producir el efecto de inducción, por lo que realiza el mismo experimento con dos bobinas cerca, pero en este caso sin usar el anillo (Ver imagen **3-4**). Nuevamente consigue desviar la aguja del galvanómetro, justo en el momento en que abría y cerraba el interruptor, así confirmó que, el fenómeno de inducción ocurre incluso si en medio de las dos bobinas hay solo aire.

En consecuencia, Faraday dictaminó que, las líneas de fuerza producidas por el electroimán atravesaban la bobina del segundo circuito. En el momento en que se abre o cierra el interruptor, dichas líneas de fuerza varían, este cambio altera el estado del circuito secundario produciendo así

una corriente. Por esta razón concluyó que, la inducción es producida por el aumento o disminución de la fuerza magnética sobre la bobina del segundo circuito.

Entonces, si lo que produce inducción es la variación de la intensidad de las líneas de fuerza magnética, se puede pensar que, el cambio en la dirección de éstas también podría causar inducción. Así pues, realmente no es necesario el circuito primario, dado que, es posible inducir una corriente simplemente cambiando las líneas de fuerza magnética que atraviesan la bobina del circuito secundario, esto puede conseguirse incluso moviendo un imán en las proximidades del circuito secundario.

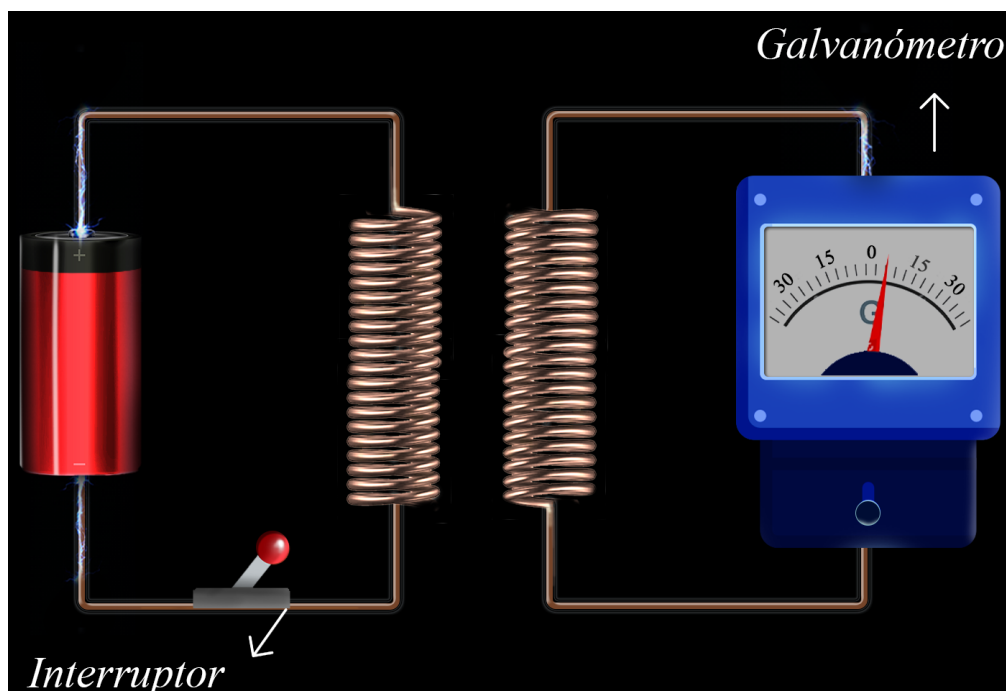


Figura 3-4.: Al encender el interruptor se genera una corriente en el circuito de la derecha. Elaboración propia.

Con el fin de corroborar lo anterior, Faraday utilizó solo el circuito secundario que, en el experimento del anillo, estaba compuesto de un solenoide conectado a un galvanómetro, en este caso el solenoide tiene el diámetro suficiente para que un imán de barra pudiese entrar y salir sin problemas (ver imagen 3-5). En el instante en que se introduce el imán al centro del solenoide, la aguja del galvanómetro marca una corriente eléctrica; por otro lado, al sacar el imán del solenoide, nuevamente se produce una desviación en la aguja, pero en sentido opuesto.

Como resultado de los experimentos mencionados, Faraday señaló lo siguiente:

La condición básica para la inducción residía en que el cable cortara las líneas de fuerza. Si una sección del cable se mueve a lo largo de una línea de fuerza, no hay fenómeno inductivo, pero si el cable corta las líneas de fuerza, y diferentes partes del circuito interceptan distinto número de líneas de fuerza, entonces se observa paso de corriente (Berkson, 2008, p.97).

En otras palabras, si las líneas de fuerza que cortan dicho cable cambian, ya sea por el movimiento entre el productor de las líneas y el cable, o el cambio en la intensidad de las líneas, se genera corriente inducida. Conviene precisar que, cuando se menciona un cable, Faraday se refiere a cualquier tipo de conductor eléctrico, sin importar su forma geométrica (un solenoide, por ejemplo).

Los experimentos de inducción llevaron a Faraday a pensar que, su teoría de las líneas de fuerza era coherente, al lograr explicar la interacción entre objetos magnéticos y eléctricos. Además, al transformar magnetismo en electricidad, y viceversa, Faraday encuentra razonable el hecho que, dichas líneas de fuerza sean en realidad de la misma naturaleza, manifestándose algunas veces en forma de magnetismo y otras en electricidad, incluso llegando a interactuar unas con otras.

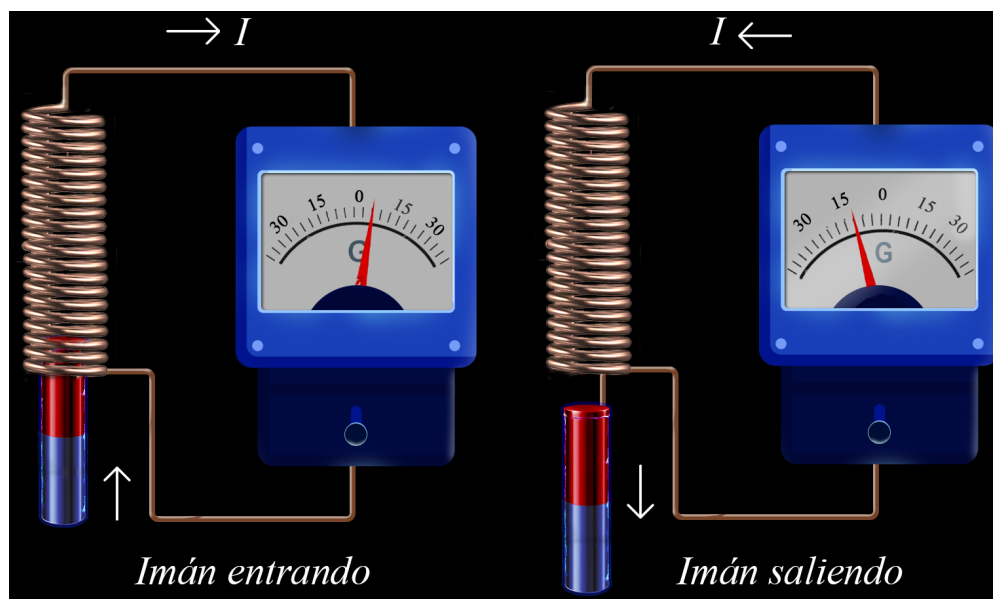


Figura 3-5.: introducir o sacar un imán en el bobinado se genera una corriente eléctrica. Elaboración propia.

Esta idea la llevó aún más lejos, al pensar que todos los fenómenos físicos podían ser explicados a partir de una forma general de líneas de fuerza. Por ejemplo, la gravitación y la luz serían otra forma de manifestación de dichas líneas. Al final, según Faraday, todas las interacciones en la naturaleza (gravitación, electricidad, magnetismo, etc.) podrían interactuar mutuamente conformando una teoría de fuerza unificada. En palabras del propio Faraday:

En filosofía experimental, podemos, por los fenómenos presentados, reconocer varias clases de líneas de fuerza; así, hay líneas de fuerza gravitacional, aquellas de inducción electrostática, aquellas de acción magnética y otras participantes de su carácter dinámico podrían quizás ser incluidas. Las líneas de acción eléctrica y magnética son consideradas por muchos como ejercidas a través del espacio como las líneas de fuerza gravitacional. (Faraday, 2015, p.500).

Con la anterior premisa, Faraday dedicó gran parte de su vida a experimentos que, pudiesen comprobar su teoría de unificación. Realizó experimentos para relacionar la química y la electricidad, donde descubrió la ley de electrólisis, la cual establece que la disociación química⁷es

⁷Disociación en química es un proceso en el cual las moléculas o sales se separan en más pequeñas, usualmente de

proporcional a la cantidad de electricidad que pasa por la disolución. Además, logró relacionar la luz con el magnetismo, en un experimento donde hace pasar un rayo de luz, a través de una solución y aplicar un campo magnético, Faraday consiguió rotar el rayo. La magnitud de la rotación está directamente vinculada a la intensidad del campo magnético y la longitud del camino que la luz recorre en la solución.

Convencido de su idea sobre la unificación de las fuerzas, Faraday pensó que la forma de comprobarlo definitivamente era, hallar una relación entre los fenómenos gravitacionales y electromagnéticos. De manera que, realizó múltiples experimentos: en primer lugar, elaboró embobinados con un núcleo de hierro, los cuales dejaba caer desde cierta altura; observaba sí este movimiento de caída libre, debido a la gravedad, generaba inducción en el bobinado. Posteriormente, modificó los elementos del experimento, cambió los tipos de núcleos y los bobinados, entre otras modificaciones, no obstante, no obtuvo resultados favorables con ningún experimento y, finalmente, no consiguió relacionar la gravedad con el electromagnetismo como esperaba.

A pesar de no demostrar la unificación de todos los fenómenos físicos, Faraday se convencía cada vez más de la veracidad de su teoría sobre las líneas de fuerza. Después de tantos años trabajando y experimentando con esta teoría, le fue posible pensar que dicha interpretación de las acciones electromagnéticas podía competir directamente con la acción a distancia newtoniana, para llegar a tal punto, le fue necesario formalizar su teoría.

3.2.3. El modelo de Campo de Faraday

Cabe recordar que, para Faraday el modelo newtoniano de las interacciones es insuficiente, por ello, tiende a inclinarse más por el modelo de Descartes y Leibniz. Esto se da principalmente por tres consideraciones: la primera, él creía que todas las fuerzas eran en realidad una sola y esta puede cambiar de forma, algo parecido a lo expuesto por Oersted⁸. Por ejemplo, la fuerza eléctrica puede transformarse en magnética, o la fuerza gravitatoria puede convertirse en eléctrica. En segundo lugar, pensaba, al igual que Leibniz, que la fuerza es una propiedad fundamental de la materia extensa y, no necesariamente, debería darse entre fuerzas centrales; y la tercera consideración, es una oposición a la idea de que la interacción entre cuerpos es instantánea en el tiempo, pues para Faraday:

La ocurrencia de un cambio en uno de los extremos de una línea de fuerza fácilmente sugiere un cambio consecuente en el otro. La propagación de la luz, y por lo tanto probablemente de toda acción radiante, se toma tiempo; y, que una vibración de una línea de fuerza debería dar cuenta de los fenómenos de radiación, es necesario que tal vibración deba también tomar tiempo. (Faraday, 2015, p.501).

La cita anterior, sugiere que, toda acción entre cuerpos debe darse en un tiempo finito. Ahora bien, de las tres consideraciones mencionadas, Faraday pensaba que había comprobado las dos primeras, pues con sus experimentos de inducción tiene pruebas de la primera consideración, asimismo, para la segunda, la curvatura en las líneas de fuerza magnética demuestra que la fuerza no era siempre central.

Es preciso aclarar que, aunque para Faraday las dos primeras consideraciones demostraban

manera reversible.

⁸Véase el inciso 2.1.3

su teoría, esto no era necesariamente cierto, pues, por una parte, la unicidad de las fuerzas no se había comprobado definitivamente, ya que, falla cuando trata de relacionar la gravitación y el electromagnetismo. Por otra parte, sobre la segunda consideración, Poisson desarrolló un sustento matemático que logra explicar la curvatura de las líneas de fuerza en términos de acciones a distancia. (Romo, J, 1991, p.12)

Por consiguiente, de las tres consideraciones, la única que no se puede explicar desde el modelo newtoniano, es la que se refiere al tiempo en el que se trasmite la acción de un cuerpo a otro, pues, en el modelo newtoniano esta se da de forma instantánea, mientras que, para Faraday toda acción tarda un tiempo finito en transmitirse.

Faraday se da a la tarea de encontrar un experimento que logre corroborar que la acción de un cuerpo a otro tarda un tiempo en producirse, lo cual sería un golpe definitivo a la acción a distancia y una importante predicción del modelo de líneas de fuerza, sin embargo, no lo logra. Ya en sus últimos años de carrera, opta por formalizar sus ideas para que sus alumnos puedan llegar a comprobar su modelo de líneas de fuerza, quedando expresadas así:

- Todas las fuerzas son básicamente de la misma clase; no hay en el fondo fuerzas eléctricas, magnéticas ni gravitatorias, sino sólo variaciones (probablemente geométricas) de un sólo tipo de fuerza subyacente.
- La propagación de cualquier cambio de la intensidad de la fuerza requiere un tiempo finito.
- Cada punto de fuerza actúa sobre los puntos vecinos (Escobar, González y Gutiérrez, 2009, p.31).

A partir de los anteriores postulados, es posible hablar en términos de un campo, pues este está constituido por líneas de fuerza, las cuales actúan de manera contigua transportando la acción de los cuerpos y permitiendo que estos interactúen; así los fenómenos físicos se producen por la modificación o perturbación de dichas líneas de fuerza.

Entonces, las partículas de materia son consideradas como aquellas donde las fuerzas, ya sea de tipo gravitacional, eléctricas o magnéticas, convergen en un punto (lo que en la tercera viñeta se expresa como punto de fuerza). Por ello, en lugar de considerarlas como puntos másicos distantes con fuerzas asociadas, se plantea que no hay una separación entre materia y espacio. Por consiguiente, sobre el espacio Faraday aclara que:

Por mi parte, me inclino a creer que cuando hay partículas de materia intervinientes (siendo ellas mismas solo centros de fuerza) ellas toman parte en el transporte de la fuerza a través de la línea, pero cuando no hay ninguna la línea prosigue a través del espacio. (Faraday, 2015, p.500).

Según esto, incluso allí donde no exista materia, habrían dichas líneas de fuerza. Si se compara la interpretación de Descartes con la de Faraday, es posible ver que ninguno de ellos hace distinción entre el espacio y la materia: para ambos el espacio que puede verse como vacío, es simplemente sustancia donde no convergen, por parte de Descartes las propiedades y, por parte de Faraday, las líneas de fuerza.

En resumen, para Faraday la interacción entre cuerpos se da por medio de las líneas de fuerza, dichas líneas transportan la acción en un tiempo finito y hacen que, por ejemplo, un imán

atraiga a otro. De cierta manera, consiguió explicar parcialmente las preguntas mencionadas al inicio de este capítulo, entonces, si fuese posible acotar en un párrafo el modelo de campo de Faraday, sería el siguiente:

¿Qué líneas de fuerza hay en la naturaleza que son adecuadas para transportar una acción tal y suplir, por la teoría de las vibraciones, en lugar del éter? No pretendo responder esta cuestión con alguna certidumbre; todo cuanto puedo decir es que no puedo percibir en alguna parte del espacio, si (para usar la frase común) vacío o lleno de materia, otra cosa sino fuerzas y las líneas en las que ellas son ejercidas. (Faraday, 2015, p.501).

Respecto a la cita anterior, es posible apreciar que, para Faraday todo cuanto existe es líneas de Fuerza, incluso llegando a remplazar el papel del éter⁹. Ya que toda acción viaja a lo largo de las líneas de fuerza, y dado que la luz es otro tipo de línea de fuerza, no habría la necesidad de un medio.

A manera de cierre, se destaca que, aunque Faraday no poseía gran conocimiento matemático, sí tenía un conocimiento profundo sobre la experimentación y formulación de teorías en la física. Fue un científico de vital importancia, sus contribuciones en el campo del electromagnetismo, la electroquímica y la óptica, entre otros, revolucionaron la comprensión científica de su época y sentaron las bases para importantes descubrimientos y avances en el siglo XX. Según Berkson “La vida de Faraday es, en cierto sentido, demasiado triste y seria, digna incluso de compasión; en otro sentido merece respeto y admiración, su vida fue un constante himno de alabanza a Dios” (Berkson, 2008, p 97).

En definitiva, su trabajo en la teoría de los campos electromagnéticos abrió una nueva forma de ver la física, al describir tales fenómenos como la acción de campos y no sólo como fuerzas en objetos puntuales. Así, con su gran influencia, las ideas de Faraday llegaron a muchos físicos, entre ellos, el siguiente gran protagonista en la construcción de la idea de campo.

3.3. James Clarke Maxwell

El modelo de campo de Faraday pasó desapercibido por el mundo científico, si bien este daba argumentos bastante convincentes en contra de la acción a distancia, no contaba con una rigurosa base matemática que pudiese hacer predicciones de fenómenos físicos. Por otro lado, el electromagnetismo de Weber ya tenía un gran avance, pues había conseguido unificar en una sola teoría la electrostática, la electrodinámica y los fenómenos de inducción electromagnética. Sin embargo, aquellas ideas de un campo no pasarían desapercibidas indefinidamente.

Para finales del siglo XVIII, los interrogantes acerca de la naturaleza de la luz estaban en auge, los científicos buscaban definir si esta se comportaba como una onda o partícula. Con los trabajos acerca de las propiedades ondulatorias de la luz de Christian Huygens, Thomas Young, entre otros; se vio decantada esta batalla hacia una naturaleza ondulatoria. Todo esto llevo a pensar que, como cualquier onda, la luz también necesita un medio para poder transmitirse, este medio se le conoce como éter.

⁹Para ese entonces, era considerado como el medio por el cual viaja la luz.

En busca de hallar las propiedades de dicho éter, Lord Kelvin, físico de gran renombre, se encontró con la teoría de las líneas de fuerza de Faraday. Para este físico, las líneas de fuerza actúan como el medio por el que viaja la luz. Interesado por esta interpretación, intentó darles un carácter matemático a estas líneas, caracterizándolas como un fluido ideal, el cual se explica desde su teoría sobre los átomos de vórtice. De este modo, los átomos que componen la materia son definidos a partir de anillos de vórtice enlazados, formando distintos nudos en un fluido ideal.

El razonamiento de Kelvin postulaba que, si se crean dos anillos de vórtice, enlazándose uno con el otro, nunca colisionarán ni se romperán, formando así un átomo indestructible. Por lo tanto, Kelvin suponía que el fluido ideal capaz de soportar dichos vórtices estables era el éter. Sin embargo, los trabajos de Lord Kelvin no resultaron en una matemática formal, pues no fueron congruentes con los experimentos electromagnéticos presentes hasta entonces. No obstante, dicho interés en Faraday tuvo un buen desenlace.

Uno de los amigos de Lord Kelvin era el físico escocés James Clerk Maxwell, quien en una ocasión con gran interés le pregunta de qué forma debería empezar a estudiar electromagnetismo, -leyendo los tratados escritos por Weber y Faraday-, responde Kelvin. Al consultar dichos trabajos, por una parte, Maxwell quedó contagiado de las grandes ideas de Faraday, por otro lado, confiesa que, a primera vista no le ha gustado lo que propuso Weber, quizá por sustentar sus teorías en la acción a distancia instantánea (Mahon. B, 2015, p.20).

3.3.1. La influencia de Faraday

Al continuar explorando las ideas de Faraday, el interés de Maxwell se incrementaba, es por ello que, al igual que Kelvin, se propone encontrar la descripción matemática de las líneas de fuerza, así en 1855 publica un artículo titulado *On Faraday's Lines of Force*. En dicho artículo, expone:

Mediante el uso de analogías de este tipo he intentado traer a la mente, en una forma conveniente y manejable, aquellas ideas matemáticas que son necesarias para el estudio de los fenómenos de la electricidad. Los métodos son generalmente los sugeridos por los procesos de razonamiento que se encuentran en las investigaciones de Faraday y que, aunque han sido interpretados matemáticamente por el Prof. Thomson y otros, generalmente se supone que son de carácter indefinido y no matemático (Maxwell, 1885, p.157).

El uso de analogías descrito anteriormente por Maxwell, es un proceso que busca una semejanza entre las ideas de Faraday y los fenómenos físicos que cuentan ya con una descripción matemática.

Maxwell inicia por matematizar la idea de líneas de fuerza, pues Faraday solo las había plasmado geoméricamente, mostrando únicamente la dirección de la fuerza, pero no su intensidad. De manera que, para encontrar una ecuación matemática que resolviera lo anterior, Maxwell pensó en tubos muy pequeños, por los cuales circula un fluido incompresible; dichos tubos representan las líneas de fuerza, mientras que, la fuente del fluido representa los cuerpos cargados. Así pues, él pensó que la presión y velocidad del fluido que circula en los tubos se compara con la intensidad de las líneas de fuerza.

En principio, Maxwell propuso una analogía entre la presión que ejerce el fluido en cualquier punto circundante (ecuación 3-1) y el potencial eléctrico (ecuación 3-2). Esta presión dependerá de la tasa de producción de la fuente (S), la distancia a dicha fuente (r) y una constante (k) que depende de la resistencia del medio; de manera análoga a la ecuación de potencial eléctrico, pues esta depende de la carga (Q), la distancia a la carga (r) y la constante de permitividad eléctrica (ϵ_0) (Maxwell, 1885, p.164-178).

$$p = \frac{k S}{4\pi r} \quad (3-1)$$

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r} \quad (3-2)$$

En el mismo artículo Maxwell hace otra analogía entre la velocidad del fluido antes mencionado y la fuerza eléctrica, según él, la ecuación que describe la velocidad del fluido en cualquier punto circundante a la fuente será:

$$v = \frac{S}{4\pi r^2} \quad (3-3)$$

$$F_e = \frac{1}{\epsilon_0 4\pi} \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \quad (2-3)$$

La ecuación (3-3) se asemeja a la de Coulomb (2-3) en el sentido de que ambas dependen del radio al cuadrado, sin embargo, dicha ecuación no predice los fenómenos electrostáticos tal como lo hace la ecuación (2-3). Lo interesante de resaltar aquí es que, partiendo de las ideas de Faraday acerca de las líneas de fuerza, fue posible llegar a expresiones matemáticas, que para ese entonces ya se habían postulado desde el modelo de acción a distancia.

Otro de los aportes que realiza Maxwell en *On Faraday's Lines of Force* es el de matematizar los fenómenos relacionados a la inducción, para lograrlo describe este fenómeno físico de la siguiente manera:

Cuando un conductor se mueve transversalmente a las líneas de fuerza magnética, surge una fuerza electromotriz en el conductor, tendiendo a producir una corriente en él. Si el número de líneas que pasan no cambia durante el movimiento, las fuerzas electromotrices en el circuito estarán en equilibrio y no habrá corriente. Por tanto, las fuerzas electromotrices dependen del número de líneas que corta el conductor durante el movimiento. (Maxwell, 1885, p.184).

Lo anterior implica que, tanto para Maxwell como para Faraday la inducción tiene relación con el número de líneas de fuerza que atraviesan los cuerpos; partiendo de esto postula que dicha inducción esta dada por la siguiente ecuación:

$$F = I \frac{k}{S} \quad (3-4)$$

Esta ecuación propone que la intensidad de magnetización (F) es igual al número de líneas de fuerza (I) que atraviesan la superficie (S); la constante k depende del medio en que se encuentren dichas líneas.

En todo caso, las ecuaciones que propuso Maxwell ya habían sido postuladas desde el modelo de acción a distancia, no obstante, lo novedoso de su trabajo, consiste en que, a partir de las ideas de Faraday, acerca de las líneas de fuerza, lograra llegar a ecuaciones que describían matemáticamente algunos fenómenos electromagnéticos; esto sirvió para que años más tarde publicara un artículo que lo cambiaría todo.

3.3.2. Modelo de Campo de Maxwell

El primer artículo que elaboró Maxwell sobre las ideas de Faraday le permitió pensar que, usando analogías podría llegar a describir los fenómenos electromagnéticos por medio de ecuaciones de campo; las cuales deben tener su respectiva representación física, además, de predecir y arrojar datos acerca de los experimentos conocidos.

En el apartado anterior, se destacaron las principales características del modelo de campo de Faraday, una de ellas es que, la interacción entre cuerpos se da de forma no instantánea, idea que compartía Maxwell. Sin embargo, este último no pensaba en un campo lleno de líneas de fuerza, sino que el campo electromagnético era en realidad un éter que obedecía las leyes de la mecánica newtoniana.

Una de las razones que llevaron a Maxwell a pensar en el campo como un éter, fue el experimento de Faraday sobre la curvatura del rayo de luz al ser expuesto a un campo magnético. Le parecía contraintuitivo que, existiera un medio para los fenómenos electromagnéticos y otro medio para los lumínicos; es así como Maxwell adopta la idea de buscar una teoría que, unificara los fenómenos físicos de la electricidad, magnetismo y la luz.

La forma en la que Maxwell llega a plantear sus ecuaciones es simplemente brillante, dado que, nuevamente, recurre a usar analogías: toma las ideas de Faraday y las aplica a fenómenos matemáticamente ya estudiados como fluidos ideales, todo esto resulta importante para él, pues creía que:

Para obtener ideas físicas sin adoptar una teoría física debemos familiarizarnos con la existencia de analogías físicas. Por analogía física entiendo esa similitud parcial entre las leyes de una ciencia y las de otra que hace que cada una de ellas ilustre a la otra. Así, todas las ciencias matemáticas se basan en relaciones entre las leyes físicas y las leyes de los números, de modo que el objetivo de la ciencia exacta es reducir los problemas de la naturaleza a la determinación de cantidades mediante operaciones con números (Maxwell, 1885, p.156).

Lo anterior no implica que, las analogías que realiza Maxwell siempre sean intuitivas, al comparar fenómenos físicos reales con mecanismos ideales, siempre existe la posibilidad de que sean incorrectos o, por lo menos, no describen ni predicen el fenómeno a tratar de forma acertada. Al estudiar como Maxwell llega a las ecuaciones de campo, a partir de un mecanismo, casi parece magia, es por esto que, el resultado de su ingenio y su gran capacidad matemática tuvo una trascendencia enorme.

A continuación, se procede a explicar, el modelo de campo y su relación con las ideas de Faraday, al mismo tiempo, se expone de manera concreta, cómo a partir de dicho modelo, Maxwell llega a las cuatro ecuaciones que conocemos hoy en día; todo esto propuesto en el artículo titulado

On Physical Lines of Force, el cual inicia así:

Me propongo ahora examinar los fenómenos magnéticos desde un punto de vista mecánico y determinar qué tensiones o movimientos de un medio son capaces de producir los fenómenos mecánicos observados. Si, mediante la misma hipótesis, podemos conectar los fenómenos de la atracción magnética con los fenómenos electromagnéticos y con los de las corrientes inducidas, habremos encontrado una teoría que, si no es cierta, sólo podrá demostrarse que es errónea mediante experimentos que ampliarán considerablemente nuestro conocimiento de esta parte de la física. (Maxwell, 1861, p.162).

Acorde a la cita anterior, se evidencia que, Maxwell pretendía hacer una teoría unificada de la electrostática, la electrodinámica y la inducción, como lo fue la de Weber. De hecho, Maxwell también quería describir los fenómenos de la luz a través de su teoría unificada.

Los cimientos para el modelo de campo de Maxwell se hallan sobre las propiedades de tensión y presión planteadas por Faraday en su teoría de las líneas de fuerza. Es por ello que, buscó algún fluido o mecanismo que contara con las anteriores características, y permitiese modelar las líneas de fuerza. Es aquí donde Maxwell se interesa por el modelo de vórtices planteado por su amigo Kelvin, a partir de este construye un campo mecánico (ver imagen **3-6**).

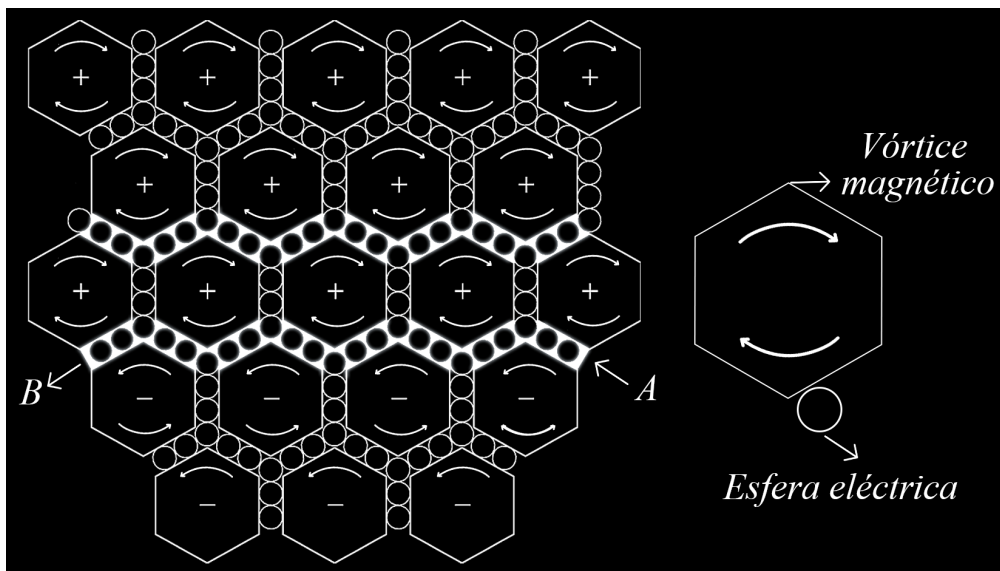


Figura 3-6.: Modelo de campo de Maxwell. Elaboración propia.

En virtud de ello, el esquema del artículo de Maxwell se compone de cuatro partes que surgen desde su modelo: primero, explica las características de los vórtices y a partir de esto, describe los fenómenos magnéticos. En segundo lugar, se refiere a las corrientes eléctricas y los fenómenos de inducción, relacionando así magnetismo con electrodinámica. Seguido, utiliza los vórtices para dar razón de la electricidad estática, introduciendo por primera vez las corrientes de desplazamiento (las cuales se explican más adelante). Finalmente, a partir de lo anterior, explica la polarización de la luz, todo esto usando comparaciones mecánicas del modelo (presión, tensión, velocidad entre otras) con magnitudes electromagnéticas (intensidad de campo magnético, eléctrico, permeabilidad y permitividad electromagnética, etc).

La notación matemática más común en aquella época, eran los cuaterniones¹⁰, es por ello que, Maxwell escribió el artículo con esta notación. Posteriormente, gracias al trabajo del físico e ingeniero eléctrico Oliver Heaviside, dichas ecuaciones se encuentran escritas en notación vectorial, al igual que en el presente documento. En este texto se explica cómo a partir del modelo de vórtices se llega a las cuatro ecuaciones de Maxwell usando un camino alterno.

3.3.3. Ecuaciones de Campo de Maxwell

El modelo de Maxwell está compuesto por vórtices, los cuales tienen en realidad forma esférica¹¹, dichos vórtices pueden rotar además de deformarse, cuando rotan la fuerza centrífuga hace que la esfera se expanda alrededor de su centro y se contraiga a lo largo del eje de giro; formando un geoide similar a la tierra que se encuentra expandida en el ecuador y achatada en los polos. Ahora bien, cuando se encuentran varios vórtices alineados girando a una misma velocidad y dirección, sucede que, los vórtices contiguos sufren una atracción en dirección del eje de rotación producto de la tensión y una repulsión lateral.

Es posible pensar en la repulsión lateral como la acción del campo magnético y en la acción a lo largo del eje como la fuerza, es decir, el campo producido por una esfera ejerce una fuerza perpendicular a dicho campo en otra esfera, hecho que concuerda con los experimentos realizados por Faraday y Oersted¹². Entonces, cuanto más rápido giren los vórtices, mayor es la fuerza atractiva en dirección al eje de rotación, además, la intensidad del campo magnético, perpendicular a este, también aumenta.

En otro aspecto, dichos vórtices tienen un momento asociado, el cual se representa con el vector \vec{A} (es el mismo vector potencial magnético). Si se consideran los vórtices como un fluido, es posible medir su rotación en cualquier punto, aplicando el operador rotacional a dicho vector¹³. Cuando los vórtices rotan, se les asocia un momento angular, de ahí que, surge la siguiente ecuación: $\nabla \times \vec{A} = I\vec{\omega}$, donde la parte derecha representa el momento angular de una esfera.

Como siguiente punto, Maxwell hace una relación directa entre la velocidad de los vórtices y la intensidad magnética ($\vec{\omega} \rightarrow \vec{H}$) y, a su vez, asocia la constante de permeabilidad magnética¹⁴ con el momento de inercia de los vórtices ($\mu_0 \rightarrow I$). Por tanto, la relación tiene un sentido físico, debido a que ambas constantes cumplen el papel de oponerse: por un lado, el momento de inercia a la rotación y, por otro lado, la constante de permeabilidad a la intensidad del campo magnético. En consecuencia, se llega a deducir una ecuación que permite calcular la intensidad del campo magnético (\vec{H}):

$$\mu_0 \vec{H} = \nabla \times \vec{A} \quad (3-5)$$

De la relación anterior, es sencillo deducir la segunda ecuación de Maxwell, pues al aplicar

¹⁰Los cuaterniones son una extensión de los números reales, similar a la de los números complejos.

¹¹la forma hexagonal que se presenta en las imágenes solo es una ayuda visual para ver el movimiento de rotación de dichos vórtices.

¹²Recuerde que Faraday y Oersted planteaban que la fuerza de atracción magnética era perpendicular al movimiento.

¹³Esto se puede hacer ya que en mecánica de fluidos el rotacional ($\nabla \times$) del campo de velocidad U se relaciona estrechamente con la vorticidad (ω), que es la medida local de la rotación del fluido.

¹⁴La permeabilidad magnética se relaciona con la capacidad de los conductores para afectar y ser afectados por campos magnéticos, y la capacidad de convertirse en fuentes de campos sin corrientes externas.

el operador divergencia a ambos lados, dará como resultado la Ley de Gauss para el magnetismo: $\nabla \cdot (\mu_0 \vec{H}) = \nabla \cdot (\vec{B}) = \nabla \cdot (\nabla \times \vec{A}) = 0$; en la cual se cumple por la propiedad vectorial del producto mixto.

Ahora bien, para que los vórtices giren en una misma dirección, es necesario que no estén en contacto directo, pues el rozamiento entre estos produce que giren en sentidos opuestos. Para lograr este efecto, Maxwell introduce esferas más pequeñas en medio de los vórtices, estas esferas pueden girar en su propio eje o trasladarse entre los vórtices. Con esto asemejó el movimiento de traslación de las esferas pequeñas con los fenómenos de corriente. Por ende, el desplazamiento de las esferas (\vec{D}) es directamente proporcional a la intensidad de campo eléctrico (\vec{E}), la constante de proporcionalidad está dada por la permitividad eléctrica del vacío ϵ_0 , entonces, la ecuación resultante es $\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E}$.

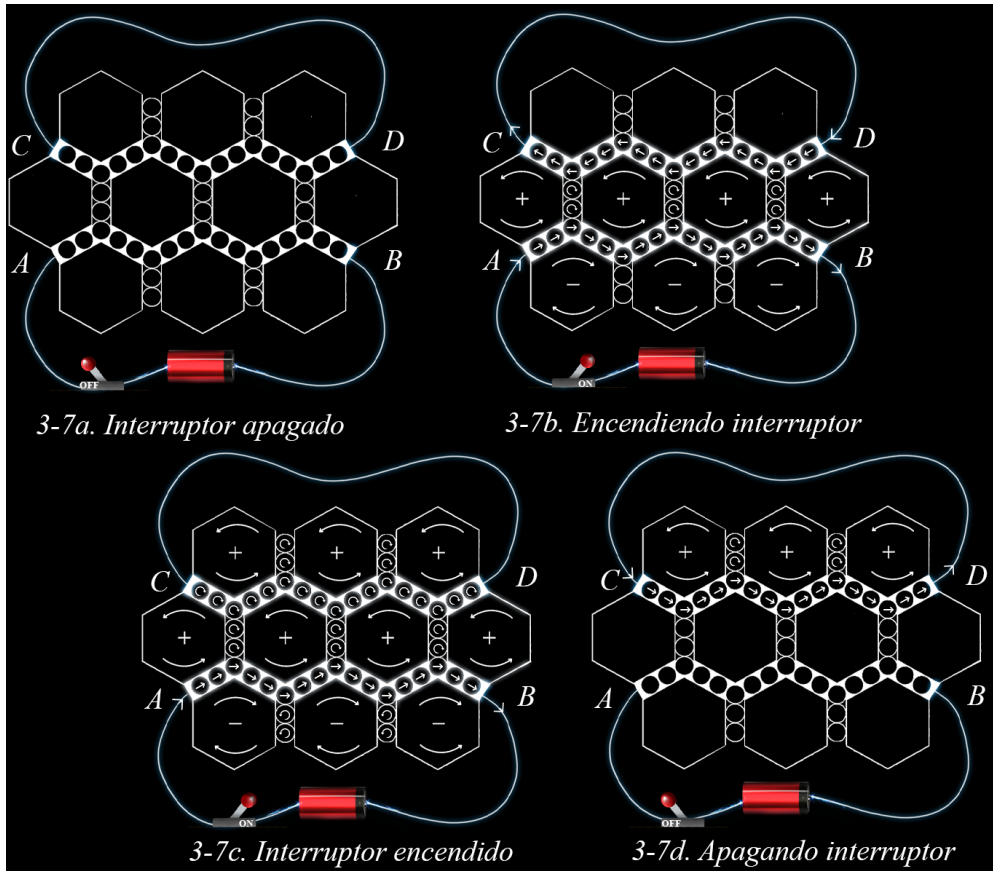


Figura 3-7.: Inducción electromagnética por medio del modelo de vórtices. Elaboración propia.

En resumen, el magnetismo se produce por la rotación de los vórtices sobre su eje y, la corriente, por el movimiento de traslación de las esferas. Ahora bien, si las esferas se trasladan, generan tensión y presión sobre los vórtices haciendo que giren, de manera análoga, al magnetismo generado por corriente. Esto se puede expresar mediante la ecuación 3-6

$$\vec{I} = \frac{1}{4\pi} \nabla \times \vec{H} \quad (3-6)$$

Donde la I representa la corriente, producto del desplazamiento de las esferas y la parte derecha, la rotación de los vórtices. Por lo cual, es coherente con los experimentos de Ampere, ya que, como se observó con anterioridad una corriente eléctrica produce magnetismo.

Siguiendo la idea anterior, se usa el mecanismo de los vórtices para explicar los fenómenos de inducción de Faraday. Para ello se considera la imagen **3-7**, en este caso hay dos circuitos distintos: el primero, se encuentra en la parte inferior, compuesto por una fuente y un conductor; el segundo, ubicado en la parte superior, se compone por otro conductor y su respectiva resistencia.

En el primer instante, antes de encender la fuente, tanto los vórtices magnéticos como las esferas se encuentran en reposo (Imagen **3-7a**). Una vez se enciende la fuente, las esferas inferiores se trasladan en la dirección del punto A al punto B, generando así tensión, la cual produce una rotación opuesta, en los vórtices inferiores y medios (Imagen **3-7b**).

Posteriormente, la rotación de los vórtices del medio genera un movimiento de traslación en las esferas superiores, no obstante, este se produce desde el punto Q hacia P, es decir, se produce una corriente inducida en sentido opuesto a la generada por el circuito uno (Imagen **3-7c**).

Ahora, las esferas que van de Q-P causan un giro en los vórtices superiores, de modo que, la velocidad de todos los vórtices y las esferas tiende a equilibrarse. Cuando la velocidad de los vórtices superiores sea la misma que en los demás, ya no habrá movimiento de traslación de las esferas de Q-P, dado que, estas van a rotar sobre su propio eje, ergo, no habrá corriente inducida (Imagen **3-7d**).

En síntesis, únicamente se produce corriente inducida mientras la velocidad de los vórtices cambie en el tiempo. Por tanto, la intensidad del campo magnético está directamente relacionada con la velocidad de los vórtices, así es posible deducir que:

$$\mu_0 \frac{d\vec{H}}{dt} = \nabla \times \vec{E} \quad (3-7)$$

La anterior ecuación, se puede expresar en términos del vector potencial magnético $fem = \frac{d\vec{A}}{dt}$. Como se aprecia en el capítulo pasado, esta relación matemática equivale a la tercera ecuación de Maxwell: la Ley de Inducción de Faraday (Mahon. B, 2015, p.100).

Llegados a este punto, solo queda por describir, el fenómeno de la electricidad estática. Pues bien, si Maxwell quería encontrar unas ecuaciones generales de campo, el mismo modelo tendría que corresponder con la ecuación de Coulomb sobre electrostática, porque esta se encontraba avalada por múltiples experimentos. Para describir los fenómenos estáticos, Maxwell agregó una nueva característica física a este modelo, ahora, las esferas pequeñas tienen la capacidad de comprimirse.

Según Maxwell, los materiales dieléctricos¹⁵ no tienen la capacidad de hacer que las esferas se trasladen, ya que estos no conducen corriente. No obstante, existen varias formas de cargar un cuerpo dieléctrico, entre ellas por contacto. Teniendo en cuenta el modelo, cuando un objeto cargado se pone en contacto con un dieléctrico, se genera una presión en las esferas que componen el campo alrededor; dicha presión se almacena en forma de energía elástica, tal como contraer un resorte. Ahora bien, cuando el aislante se pone en contacto con otro cuerpo cargado, la energía de

¹⁵Un material dieléctrico, se caracteriza por poseer una baja conductividad eléctrica y tiene la propiedad de formar dipolos en su interior, bajo la acción de un campo eléctrico externo.

las esferas se libera generando pequeños desplazamientos, a esto se le conoce como *corrientes de desplazamiento*.

A manera de ejemplo, si un cable está separado por placas paralelas entre las cuales se encuentra un material aislante como el aire, la corriente pasa por el conductor hasta llegar a la placa. Las esferas que componen el campo circundante a la placa no transfieren corriente, por ello, se genera presión que se trasmite de los vórtices a las esferas y viceversa, hasta llegar a la otra placa; entonces, a partir de dichas presiones se produce una corriente de desplazamiento en medio de las placas. De manera que, surge un flujo continuo de corriente, incluso allí donde no está el conductor. Con el fin de explicar esto, Maxwell modificó la ecuación de Ampere antes mencionada, porque, ya no solo la corriente continua generaría un campo magnético, pues la variación de desplazamiento en las esferas debido a la presión ($\frac{d\vec{D}}{dt}$), también genera una corriente que aporta a la intensidad de campo magnético. Con esto, Maxwell modifica la ecuación de Ampere y se le conoce posteriormente como su cuarta ecuación: La ley de Ampere-Maxwell, donde \vec{J} es la densidad de corriente.

$$\nabla \times \vec{H} = 4\pi\vec{J} + \frac{d\vec{D}}{dt} \quad (3-8)$$

La implicación que tuvo el término añadido a la ecuación de Ampere es enorme, en primer lugar, es posible hacer una distinción entre el campo que imaginaba Faraday y el que propone Maxwell. El ejemplo anterior, relacionado con las placas paralelas, señala cómo la materia (conductores y aislantes), afecta y es afectada por el campo circundante a esta. Aquí, Maxwell hace una notoria diferencia entre materia y campo: es decir, donde no exista nada material, también hay fenómenos electromagnéticos como intensidades de campo, entre otras; contrario a Faraday, quien sostenía que materia y campo eran en realidad uno solo.

Finalmente, solo resta deducir la primera ecuación, para ello se utiliza el operador divergencia, que sirve para medir como cambia la densidad de flujo de las esferas en un punto. Luego, al aplicar la divergencia al desplazamiento de estas, da como resultado la densidad de dichas esferas. Dado que, la corriente se determina por el desplazamiento de las esferas; es posible expresar lo anterior en términos de corriente, lo cual Maxwell hace en su primera ecuación llamada Ley de Gauss:

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (3-9)$$

Cabe resaltar que, a partir de la Ley de Gauss, es posible deducir la ecuación de Coulomb. De esta manera, Maxwell alcanzaría su objetivo de unificar la electrodinámica, electrostática e inducción electromagnética en una sola teoría, todo esto gracias a su modelo de vórtices. Ahora bien, para completar su teoría de unificación, solo resta explicar el comportamiento de la luz. Así pues, en aquellas corrientes de desplazamiento encuentra la clave para relacionar todos estos fenómenos en una sola teoría.

3.3.4. La luz como fenómeno electromagnético

Es preciso tener presente que, hasta el momento, las ecuaciones de campo de Maxwell daban cuenta de los mismos fenómenos físicos que la teoría de acción a distancia de Weber. Sin embargo,

guiado por las ideas de Faraday; quien sostiene que las interacciones físicas deberían darse en un tiempo finito. Esto debido a que, para Maxwell, tiene sentido ontológico que, el actuar de un cuerpo a otro fuera parte de un proceso de causa y efecto. Al iniciar este apartado, se señaló que, él buscó un campo que cumpliera el papel de éter, pero ¿de qué manera podría llegar a relacionar los fenómenos electromagnéticos con los de la luz?

Durante una temporada, Faraday intentó medir el tiempo que tardaba un cuerpo eléctrico en inducir otro, Maxwell se interesó en este experimento y decide plantearlo teóricamente desde su modelo de vórtices:

Según esto, en el modelo de vórtices, la forma en la que un cuerpo induce una corriente en otro corresponde a una reacción en cadena, como si el campo tuviera propiedades ondulatorias. Con la particularidad que, dichas ondas deberían ser transversales, puesto que la dirección es perpendicular a la intensidad o perturbación de esta. Teniendo en cuenta que, el modelo de Maxwell se puede considerar dentro del esquema de un fluido que cumple la mecánica newtoniana, de tal suerte que, en esta época ya existía una ecuación para encontrar la velocidad de una onda transversal en un fluido con dichas características.

$$v^2 = \frac{r}{d} \quad (3-10)$$

Esta ecuación relaciona la rigidez (r) y la densidad (d) del fluido, con la velocidad de propagación. Ahora bien, para encontrar la velocidad de propagación en el modelo de vórtices, surge la necesidad de asociar la rigidez y densidad con magnitudes electromagnéticas. Por una parte, para encontrar la densidad del fluido, Maxwell despreció la masa de las esferas y solo tuvo en cuenta la de los vórtices, como la masa de estos se relaciona con la constante de permeabilidad magnética, él encontró que la densidad del fluido es $d \rightarrow \mu_0$.

Por otro lado, según el modelo, la rigidez depende de cuánto pueden o no comprimirse las esferas; ahora bien, dicha compresión genera desplazamiento, el cual, como se mencionó anteriormente, se relaciona con la constante de permitividad eléctrica del vacío, entonces la rigidez está dada por $r \rightarrow \frac{1}{\varepsilon_0}$.

Sustituyendo la rigidez y densidad en la ecuación (3-10), se obtiene la velocidad con la que un cuerpo eléctrico induce a otro:

$$v = \sqrt{\frac{1}{\mu_0 \varepsilon_0}} \quad (3-11)$$

Teniendo en cuenta que, las constantes electromagnéticas ($\mu_0 \varepsilon_0$) ya habían sido medidas en un experimento por Weber y Kohlrausch, Maxwell reemplazó estos datos en la ecuación (3-11) para calcular la velocidad de inducción, obteniendo como resultado 310,740 kilómetros por segundo. Mientras que, en 1849, Hippolyte-Louis Fizeau, midió que la velocidad de la luz en el aire es de 314,850 kilómetros por segundo. Al comparar, es posible observar que, los resultados se acercan mucho para ser una simple coincidencia.

Entonces, ¿la luz podría ser considerada como un fenómeno electromagnético? Cuando Maxwell publica su artículo, no estuvo exento de críticas. Los físicos veían este modelo como inverosímil, pareciera que un mundo de vórtices y esferas era demasiado imaginativo para ser

real, además, cómo podrían estos campos interactuar con la materia... el mismo Maxwell no se encontraba satisfecho con su propio modelo.

Tiempo después, Maxwell demuestra que, existen infinidad de maneras para llegar a las ecuaciones de campo, utilizando diferentes modelos mecánicos. Por ello, en el artículo titulado *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field*, decide plantear sus ecuaciones sin el uso de analogías ni su modelo de vórtices. Para ello, en la introducción de su artículo, expone que:

La teoría que propongo podría llamarse una teoría del Campo Electromagnético, porque tiene que ver con el espacio en las proximidades de los cuerpos eléctricos o magnéticos, y podría llamarse una Teoría Dinámica, porque asume que en ese espacio hay materia en movimiento, mediante la cual se producen los fenómenos electromagnéticos observados. El campo electromagnético es esa parte del espacio que contiene y rodea a los cuerpos en condiciones eléctricas o magnéticas. (Maxwell, 1865, p.460).

De tal forma que, define los fenómenos electromagnéticos como propiedades fundamentales que afectan los cuerpos y la región circúndate, generando interacciones entre estos.

Por consiguiente, Maxwell, dejó a un lado cualquier mecanismo y llegó a las mismas ecuaciones del artículo anterior, buscando las relaciones matemáticas que calculan la energía eléctrica y magnética, en cualquier punto alrededor de un cuerpo¹⁶. No obstante, hay dos cosas que fueron producto únicamente del modelo de vórtices, la primera, corresponde a las corrientes de desplazamiento; la segunda, se refiere a los fenómenos de la luz.

Con el fin de explicar lo anterior, sin el modelo de vórtices, utiliza sus ecuaciones con gran ingenio, demuestra matemáticamente las corrientes de desplazamiento y, a partir de éstas, relaciona los fenómenos electromagnéticos con la luz, ver anexo E.

De modo que, Maxwell logró establecer una teoría que unificaba la electricidad, el magnetismo y los fenómenos de la luz, planteando así una nueva forma de ver el mundo. Ahora, las interacciones físicas ya no serían contempladas a través de acciones a distancia, sino que, podrían ser producto de un medio aparentemente invisible llamado campo. Según Faraday, este se compone de líneas de fuerza y, por su parte Maxwell, lo interpreta como un éter.

El modelo de interacción que plantea la teoría de Maxwell propone que materia y campo son entes diferentes, a diferencia de todos los modelos expuestos en este capítulo, ya que, según Descartes, Leibniz, Oersted y Faraday, el medio y la materia son lo mismo. Es decir, para ellos las interacciones entre cuerpos son producto de las acciones contiguas, en otras palabras, un punto de materia le comunica a sus vecinos la acción o el movimiento y esto se repite hasta llegar a un punto distante.

Entonces, haciendo una diferenciación entre materia y campo, ¿cómo se pueden entender las interacciones físicas? Para responder a esto, es posible decir que, la materia modifica o deforma el campo circundante y, cuando otro cuerpo entra en contacto con el campo, este modifica su estado de movimiento produciendo interacción. A manera de ejemplo, imagine que un niño se encuentra fuera de una piscina y quiere realizar un experimento: en un primer momento, el niño lanza un balón dentro de la piscina, al caer, nota como este produce ondas alrededor. Aquí, el medio en el cual se encuentra el balón es el agua de la piscina, mientras que, las ondas generadas se consideran

¹⁶Para Maxwell toda energía era energía mecánica es decir que produce movimiento.

las deformaciones de dicho medio.

En segundo lugar, el niño espera que el balón lanzado se aquiete y esté en reposo junto con el agua. Una vez sucede esto, lanza otro balón cerca del anterior, pero sin que choquen. Ahora, el niño nota como las ondas de agua producidas por el segundo balón, logran mover (hacerlo oscilar) el primero. Usando esta analogía, se explica como la acción de un cuerpo a otro, se produce por la modificación del campo o medio en el que se encuentren.

Ya consolidado el modelo de Maxwell, se tienen dos tipos de interacción: la acción a distancia y acción mediata. La teoría del campo solo era superior a la de Weber, en el sentido que, añadía el comportamiento de la luz. Sin embargo, los experimentos electromagnéticos eran explicados por ambas teorías y las ecuaciones a las que llegó Maxwell, también cuentan con una explicación desde la acción a distancia. No obstante, Maxwell había hecho una predicción que Weber no: calculó la velocidad con la que un cuerpo induce a otro (recuerde que para Weber esta era instantánea). Si algún experimento pudiese corroborar la predicción de Maxwell, sería un duro golpe para la acción a distancia, es aquí donde hace su aporte el físico alemán Heinrich Rudolf Hertz.

4. El descubrimiento de las ondas electromagnéticas

La comunidad científica inglesa empezó a ver en la teoría de Maxwell una gran oportunidad, por lo que muchos científicos empezaron a trabajar en estas ideas, entre ellos John Henry Poyntin, quien utilizó las ecuaciones de Maxwell para intentar explicar cómo se transporta la energía en un medio. Mientras que, en el Reino Unido estaban incursionando en el concepto de campo, la ciencia alemana seguía firme en la visión newtoniana de interacción. Para ese entonces, la teoría de Weber acerca del electromagnetismo estaba por encima de la gran mayoría de teorías y, pocos científicos conocían las aportaciones que había realizado Maxwell.

El físico alemán Hermann Von Helmholtz, interesado en el electromagnetismo, fue el primero en acercarse y llevar las ideas de Maxwell a su país. Aun cuando pensaba que, dichas ideas no eran del todo correctas y que no se podía desechar lo que por años uno fue de los pilares más importantes de la ciencia, es decir, la acción a distancia; Helmholtz trabajó gran parte de su vida en dicha teoría y se convirtió en el puente que permitió llevar, esas ideas maxwellianas a su alumno Hertz, quien, en principio, también era un fiel seguidor de la acción a distancia.

En el año 1879, la Academia de Berlín ofrece un premio a quien consiga establecer, experimentalmente, alguna relación entre las fuerzas electromagnéticas y la polarización de dieléctricos. Como se mencionó en el apartado de las ecuaciones de Maxwell, los dieléctricos pueden ser cargados, pese a que, en dicha época, era muy difícil detectar las intensidades electromagnéticas producidas por la polarización de un dieléctrico, ya que estas eran muy pequeñas; Helmholtz logra convencer a Hertz para que se ocupe de esto.

En consecuencia, Hertz realiza una serie de experimentos, en los cuales usa como marco teórico las principales cuatro teorías de interacción electromagnética (acción a distancia, teoría del potencial, modelo de Helmholtz y campo de Maxwell). Al observar los experimentos parece que, uno tras otro, Hertz se fue convenciendo cada vez más de la idea de campo de Maxwell y desechando la acción a distancia.

4.1. Interpretaciones sobre las interacciones electromagnéticas

La primera interpretación que Hertz menciona es la acción a distancia y con ello la teoría electromagnética de Weber explicada anteriormente. La segunda, viene dada por el físico alemán Franz Ernst Neumann, quien propone una teoría del potencial electromagnético, la cual Hertz describe así:

“uno solo de los cuerpos en interacción tiene constantemente la tendencia de producir en cada punto de su entorno atracciones de una determinada intensidad y dirección,

también cuando no se encuentran en su proximidad otros cuerpos semejantes a él” (Hertz, 1990, p.55)

Según esto, un cuerpo electromagnético tiene el potencial de influir en su entorno y producir interacciones con cuerpos vecinos. Ahora bien, todo esto se da de forma instantánea, pero se diferencia de la acción a distancia, al no considerar lo que rodea a la materia como espacio vacío, sino algo que puede sufrir perturbaciones.

La siguiente interpretación que menciona Hertz, es la de su maestro. Helmholtz construyó su teoría tomando ideas de la acción a distancia y la modificación del medio o campo, como él sostenía que, la teoría de Weber no cumplía con el principio fundamental de la ley de conservación de energía¹, decide complementarla. De esta manera, Hertz describe la teoría de su maestro:

“Admite que las fuerzas a distancia inmediatas no determinan por sí solas la acción entre cuerpos separados. Admite más bien que las fuerzas producen modificaciones en el espacio, que se imagina lleno por todas partes, las cuales ocasionan a su vez nuevas fuerzas a distancia. Las atracciones entre cuerpos separados se deben pues, en parte a la acción a distancia inmediata entre ellos, y en parte al influjo del medio modificado. La modificación misma del medio se imagina como una polarización eléctrica o magnética de sus partes más pequeñas bajo el influjo de la fuerza actuante” (Hertz, 1990, p.53).

Es decir, allí donde esté presente el vacío, la teoría de acción a distancia sirve para explicar las interacciones electromagnéticas. De otro modo, donde exista algún medio, por ejemplo, el aire, se podría aplicar los principios de Maxwell.

Finalmente, la cuarta interpretación es la teoría de campo de Maxwell, donde toda interacción electromagnética es determinada por la perturbación de campos.

Así pues, con las cuatro interpretaciones ya establecidas, es posible aproximarse a los experimentos de Hertz y escoger qué teoría puede ser más útil al momento de interpretar lo que sucede.

4.2. Experimentos de Hertz y resultados

En el año 1879, Hertz inicia una serie de experimentos, impulsado por su maestro, para optar por el premio que otorga la academia de Berlín; hasta que, finalmente, en 1888 realiza el experimento cuyo resultado cambia la historia de la ciencia. Seguir paso a paso todo su trabajo resulta interesante, aún más cuando se quiere abordar en profundidad sus implicaciones, sin embargo, referirse a dicho trabajo abordaría una tesis entera; es por ello que, se puede resumir esta serie de experimentos en tres pasos que propone M. García Doncel (1990):

1. Descubre corrientes de polarización en los dieléctricos (Maxwell las había llamado corrientes de desplazamiento).
2. Ve al espacio mismo como un dieléctrico capaz de ser polarizado, cuando detecta que la acción eléctrica inductora se propaga por él con una velocidad finita.

¹Aunque como se observa en el apartado 2.6 si lo cumplía

3. Descubre que la propagación de esa fuerza eléctrica posee carácter ondulatorio y todas las propiedades de la luz

Primer paso: Para cumplir el reto de la academia, Hertz debía presentar un experimento capaz de comprobar la relación entre la fuerza electromotriz y los dieléctricos. Por tal motivo, pensó en el aire como un tipo de dieléctrico, para cargarlo utilizó un circuito oscilante llamado emisor, el cual está compuesto por un par de condensadores (esferas capacitivas) y una bobina (Bobina de Ruhmjoff).

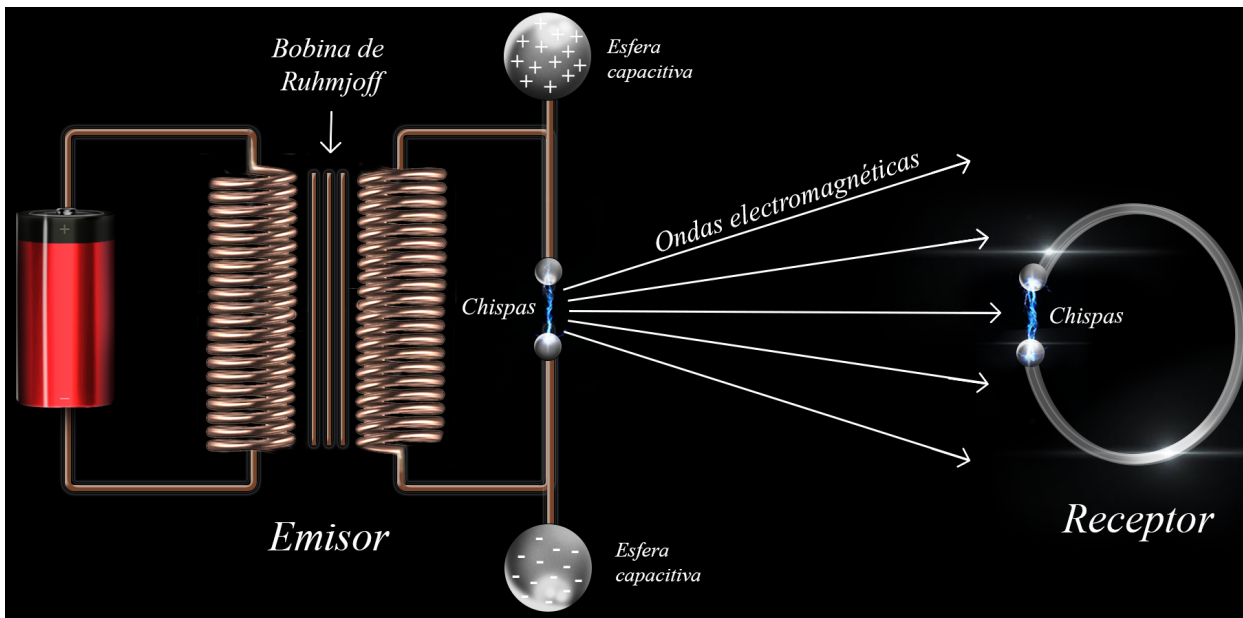


Figura 4-1.: Experimento de Hertz dipolo oscilante. Elaboración propia

De esta manera, cuando se aplica un voltaje al circuito, el condensador almacena energía eléctrica hasta llegar a su máxima capacidad, luego, comienza a transferir corriente a la bobina, generando en esta un campo magnético cada vez mayor; simultáneamente, el campo generado, induce una corriente que carga gradualmente el otro capacitor. Este proceso se repite periódicamente, generando oscilaciones de corriente, así pues, mientras un capacitor posee carga positiva, el otro tendrá carga negativa. Como resultado, se logra crear un dipolo oscilante. De forma que, Hertz no cierra el circuito dejando una pequeña separación, entonces, al aplicar voltaje, se generan chispas, tal como se aprecia en la imagen (4-1).

Como consecuencia, para detectar la carga que se genera en el aire, Hertz construye un segundo circuito llamado receptor; el cual se compone de un anillo conductor, que tiene una pequeña abertura, similar a la del primer circuito. Posteriormente, se ubica cuidadosamente a cierta distancia del primero, cuando el emisor produce chispas, se carga el dieléctrico; eventualmente, el aire induce una corriente en el receptor, generando así nuevamente chispas.

Sus primeros experimentos no mostraron resultados favorables, sin embargo, con dedicación y constancia, al cabo de los años, logra adecuar sus instrumentos. Por ende, en 1887, demuestra que, un material dieléctrico expuesto a un oscilador induce corriente, esto se aprecia por medio de las chispas generadas en el receptor. De hecho, Maxwell ya había predicho este fenómeno, con lo

que él denominó corrientes de desplazamiento.

Una vez logrado esto, Hertz varía la separación entre el emisor y receptor, entonces, nota que la intensidad de corriente no disminuye si aumenta la distancia entre estos. Cabe recordar que, según el modelo newtoniano, la intensidad disminuye con el cuadrado de la distancia; es decir, si se tiene el doble de separación, en teoría, la intensidad debería ser cuatro veces menor.

Al intentar explicar el fenómeno anterior, desde la acción a distancia se evidenció que los resultados parecían no ser acordes a la teoría. Es por ello que Hertz retoma el campo de Maxwell y observa algunas ventajas sobre las otras teorías, no obstante, no se encuentra del todo convencido, por esto, decide realizar otro experimento.

Segundo paso: Durante un gran periodo de tiempo, Faraday intentó comprobar que, las interacciones electromagnéticas no son instantáneas. A pesar de no conseguirlo, fue Maxwell quien demostró que, esta idea tenía un sustento teórico y no solo filosófico, al calcular que la velocidad de la luz y la interacción son equivalentes. Al respecto, Hertz deduce que con el dipolo oscilador, puede demostrar que los campos se comportan como ondas.

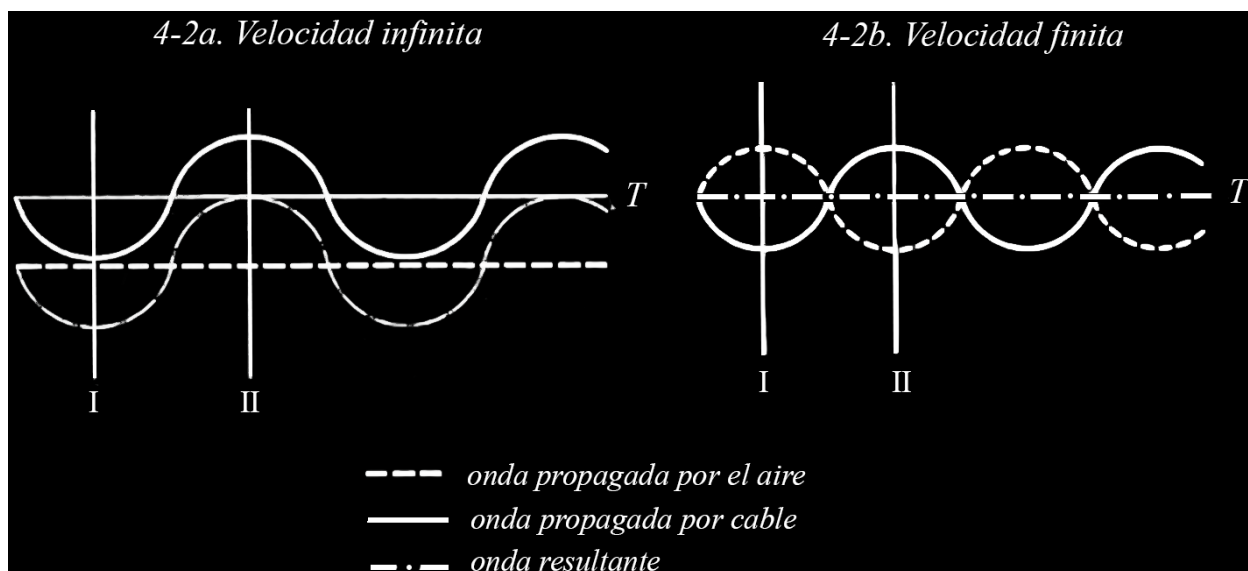


Figura 4-2.: Posibles resultados al medir la velocidad de interacción. Adaptado de Hertz, 1990.

El oscilador sirve para producir ondas con una frecuencia determinada (f), si Hertz conseguía medir la longitud de onda (λ), con un cálculo relativamente fácil ($v = \lambda f$), podría determinar su velocidad. Si, por el contrario, Hertz encuentra velocidades infinitas para las ondas, le daría la razón al modelo de acción a distancia, esto implicaría, el declive en la teoría de Maxwell; en aquel momento era un experimento realmente decisivo el que estaba a punto de realizar Hertz.

En principio, Hertz crea un instrumento capaz de generar ondas estacionarias², compuesto por un dipolo oscilante, al cual le agrega un cable conductor. Por aquel momento, era bien conocido que la corriente en un conductor viaja a la velocidad de la luz, así mismo, Maxwell predijo que, a esa velocidad viajan las ondas electromagnéticas. Entonces, si la onda que va por el cable y la

²Una onda estacionaria es aquella perturbación oscilatoria en la cual ciertos puntos denominados nodos permanecen inmóviles.

que va por el aire tienen la misma frecuencia; por el fenómeno de resonancia, se crean dos ondas que se cancelan en los nodos. Si se usan receptores, podría calcularse en qué parte de la onda se producen los nodos y así medir la distancia de nodo a nodo, para determinar la longitud de la onda resultante.

Una vez realizado el experimento, hay dos posibles resultados: por una parte, si la acción de un cuerpo a otro es infinita, el único efecto ondulatorio medible será el del cable, además, con la interferencia que genera el oscilador, la onda resultante será la que se muestra en la imagen (4-2a). Por otro lado, si las ondas en el aire y en el cable se suman, dan como resultado una onda estacionaria (imagen 4-2b), lo que significa que la acción no es instantánea.

Como resultado, Hertz obtuvo un patrón de interferencia, el cual mostraba que, la velocidad de las ondas electromagnéticas en el aire es de 320.000 km/s. Él no solo había medido experimentalmente que, la acción de un cuerpo a otro transcurre en un tiempo finito, sino que esta interacción viaja a la velocidad de la luz. Así, de las cuatro teorías hay una ganadora, sin embargo, Hertz no solo se quedó en este experimento; para probar definitivamente el carácter ondulatorio de la propagación electromagnética, se propuso demostrar propiedades concernientes a una onda: reflexión, refracción, difracción, etc.

Tercer paso: Hertz demostró que las ondas electromagnéticas producidas por el emisor pueden ser polarizadas, para ello, usó una rejilla de alambres que se comporta como una lámina polarizadora. Posteriormente, la ubicó en medio del emisor y receptor, con una inclinación de 45 grados. De esta manera, el receptor solo detecta las ondas que pasen el filtro, es decir, las que tienen el mismo ángulo. Así lo describe Hertz:

Evidentemente la pantalla descompone la oscilación incidente en dos componentes, y deja pasar solo a la que es perpendicular a la dirección de sus alambres. Esta componente está inclinada a 45° respecto a su línea focal, y es capaz de ser descompuesta por el espejo para actuar por el conductor secundario (Hertz, 1990, p.133).

Lo anterior significa que, la onda electromagnética es capaz de ser descompuesta y polarizada en una dirección. Teniendo en cuenta esto, la siguiente propiedad a demostrar es la reflexión, para lo cual, Hertz utilizó un cuarto amplio y oscuro. En cada extremo de la misma pared colocó el emisor y el receptor, mientras que, en el centro de la pared opuesta, ubicó una lámina de zinc que funciona como espejo. Al encender el emisor, las ondas se reflejan en la placa de zinc, acto seguido, estas chocan con el receptor y producen chispas; como consecuencia, Hertz encontró que el ángulo de incidencia es igual al reflejado.

Para confirmar que, efectivamente se trata de una reflexión, Hertz puso un obstáculo en el camino que traza la onda, al hacer esto, el receptor no detecta ninguna chispa. De este modo, se evidencia que las ondas electromagnéticas se reflejan.

Por último, Hertz demuestra que las ondas se pueden refractar. Para ello, utiliza pantallas polarizadoras, las cuales generan un rayo que pasa a través del aire y un prisma. Luego, con el detector, logra calcular que dicho rayo se inclina 65 grados al pasar del aire al prisma, señalando que, cuando se cambia la naturaleza del medio, la onda electromagnética experimenta un cambio de dirección.

Después de estos experimentos, Hertz afirma con certeza que, la interacción electromagnética tiene un comportamiento ondulatorio, así lo expresa:

“Al plantear esos experimentos y al describirlos, dejamos de pensar eléctricamente, pensamos ópticamente. Ya no vemos corrientes circulando por los conductores, o electricidades acumulándose. Vemos únicamente las ondas en el aire, cómo se entrecruzan, cómo se dividen, se reúnen, se refuerzan y debilitan” (García Doncel, M., 1994).

Estas palabras son la antesala a una nueva etapa para la ciencia, donde la visión del mundo acerca de los fenómenos físicos se entendería a partir de campos

4.3. Acción a distancia vs acción debida al medio

La controversia acerca de las interacciones físicas dejó a su paso gran riqueza de conocimientos, el camino iniciado por Newton y su concepto del espacio vacío, abre paso a la contrapropuesta dada por Descartes y Leibnitz, quienes creían en un mundo lleno de extensión y movimiento. Estas dos cosmovisiones distintas, sirvieron de base para que, Ampere desde la acción a distancia y, Oersted desde la acción finita, se enfrentaran por encontrar la relación entre corrientes y magnetismo. Posteriormente, a esta disputa se suma Faraday, quien obstinado por ir en contra de las interacciones instantáneas, descubre la forma de producir inducción electromagnética.

	Acción a distancia	Acción debida al medio
Principales defensores	Newton, Coulomb, Ampere, Weber	Descartes, Leibniz, Oersted, Faraday, Maxwell
Concepción del espacio	Vacío	Lleno de algún medio (Extensión, líneas de fuerza, éter)
Velocidad de interacción	Infinita	Finita
Fenómenos físicos descritos	Gravedad, magnetismo, electrostática, electrodinámica, inducción electromagnética	Gravedad, magnetismo, electrostática, electrodinámica, inducción electromagnética, desplazamiento de corrientes, ondas electromagnéticas, luz
Principales aportes	Ley de gravitación universal, ley de Coulomb, ley de Ampere, ley de Weber	Principio de conservación de la cantidad de movimiento, primera relación entre corrientes y magnetismo, ley de inducción, unificación del electromagnetismo con la luz

Tabla 4-1.: Comparación entre acción a distancia y acción mediata. Elaboración propia.

Con lo anteriormente logrado, Faraday busca encontrar una teoría unificadora, el mismo objetivo lo tuvo Weber, quien se negaba a dejar en el pasado las ideas de Newton y, por ello, construye una ley que explicaba todos los fenómenos electromagnéticos del momento. Dicha ley parecía no tener rival, hasta que, la perspicacia de un físico teórico sirvió para matematizar aquellas ideas de Faraday.

Así, Maxwell pone sobre la mesa la concepción del electromagnetismo como onda, trayendo luz a las teorías, no solo de forma metafórica, puesto que, establece un modelo de campos que se

convierte en la semilla para las teorías modernas. Al concebir la existencia de ondas electromagnéticas, se plantean las problemáticas que permiten a Einstein construir la relatividad especial y, por otro lado, llegar a la idea de cuerpo negro, lo que implica el inicio de la mecánica cuántica.

Con seguridad, si existió un juez que dictaminó el ganador de esta disputa, tuvo que ser Hertz, quien, de manera casi involuntaria, demostró que las interacciones físicas no son instantáneas, marcando un antes y un después en la controversia. En resumen, se muestra un esquema con los principales aportes y diferencias entre ambos modelos, junto con sus respectivos protagonistas (ver tabla 4-1).

Aunque la acción a distancia pasara a un segundo plano, en la modernidad volvió a estudiarse. Las acciones instantáneas parecían ser la única explicación para el entrelazamiento cuántico, este fenómeno permite que una partícula influya en el estado de otra instantáneamente, incluso si están a años luz de distancia. Einstein denominó dicha teoría, de forma peyorativa, como *acción fantasmal a distancia*³, sin embargo, esta fue nuevamente desechada cuando el entrelazamiento cuántico pudo ser explicado a través de las desigualdades de Bell.

Total, el estudio de las interacciones físicas no termina aquí. A partir de la metodología utilizada, es posible continuar explorando teorías modernas de interacción; por ejemplo, la teoría cuántica de campos. Donde las fuerzas fundamentales se describen como el intercambio de partículas mediadoras llamadas bosones de gauge, los cuales transmiten las interacciones entre partículas.

Resumiendo, a lo largo del presente documento, se realizó una reconstrucción histórica de los dos modelos de interacción más importantes hasta finales del siglo XIX, no obstante, el preguntarse ¿cómo se comunican los cuerpos? Continúa siendo objeto de estudio.

³Bohm, D. y Aharonov, Y. (1957). Discusión de la prueba experimental de la paradoja de Einstein, Rosen y Podolsky. *Revisión física*, 108, 170-1076.

Conclusiones

Una vez realizada la reconstrucción histórica, se evidenció que, fue posible acercarse a algunos conceptos del electromagnetismo (como electrostática, electrodinámica e inducción entre otros), sin un salto abrupto del modelo de acción a distancia a la noción de campo. A lo largo de este documento se presentaron diferentes aportes realizados en distintas épocas, que contribuyeron a entender el electromagnetismo clásico y sus interacciones.

En la presente monografía, se encontró que el modelo de interacción newtoniano “acción a distancia”, cuenta con transformaciones graduales que se dan entre los siglos XVII hasta finales del XIX. Dichos cambios, dieron paso a detractores y defensores, quienes propiciaron adaptaciones y evoluciones en este concepto. Al realizar las indagaciones, se enfatizó en identificar las características que definen el modelo de acción a distancia, para así, con base en estas, relacionar qué teorías electromagnéticas hacen parte de la interacción newtoniana. Como resultado se encontró que las principales características son: la acción de a un cuerpo a otro debe ser instantánea, el espacio en que interactúen las magnitudes físicas ha de ser vacío, la acción debe darse entre fuerzas centrales y proporcionales al inverso de la distancia al cuadrado.

En medio de la búsqueda, la escasez de material detallado sobre los trabajos de Weber en español, ha sido un gran reto para la realización del segundo capítulo, puesto que, son pocas las traducciones de su trabajo al idioma castellano; no obstante, se ha compensado esta limitación mediante la presentación de gráficos y demostraciones matemáticas, contribuyendo así a futuras consultas y estudios sobre esta teoría.

Para el tercer capítulo, se enfatizó en el modelo rival de la acción a distancia, la interacción mediata. Dicha interacción, posee raíces cartesianas, sustentada en los conceptos de extensión, movimiento y fuerza; desde los cuales Faraday construye su noción de campo que, posteriormente modifica y matematiza Maxwell. En primera instancia, se encontró las similitudes entre los distintos modelos de acción mediata, ya que, así se pudo trazar la evolución de las ideas que, finalmente condujeron a una comprensión más avanzada de las interacciones electromagnéticas. Para ello, fue determinante la descripción de los experimentos, reales o mentales, puesto que, se utilizaron para encontrar aspectos clave en la viabilidad de cada modelo. Por otra parte, una dificultad al momento de presentar este apartado, fue describir las nociones de campo y materia, porque, como se evidenció, son conceptos que poseen múltiples aristas para ser abordados; no obstante, con ayuda de imágenes, se plasmaron las principales características de estos.

Finalmente, en el cuarto capítulo, se analizó el impacto que tuvo el descubrimiento de Hertz, a partir de la síntesis de los dos modelos de interacción. Al comparar dichas teorías, se concluyó que, el hallar la forma de medir la velocidad de las interacciones, fue clave para decidir cuál de los dos modelos es el más óptimo. De esta manera, se llega a la detección de ondas electromagnéticas; este hallazgo proporciona una perspectiva única sobre cómo esta aparente controversia fue de utilidad para revelar la naturaleza ondulatoria de los fenómenos electromagnéticos.

Cabe destacar que, se consiguió elucidar el cambio de perspectiva de Hertz en cada experi-

mento mostrado, evolucionando desde una inclinación por el modelo newtoniano hasta el reconocimiento de la noción de campo. En el proceso de desarrollar este segmento, se enfrentó el desafío de seleccionar qué experimentos específicos de Hertz describir, dado que fueron múltiples los ensayos llevados a cabo, cada uno de los cuales contribuyó gradualmente al entendimiento de las ondas electromagnéticas.

A partir de lo expuesto, se evidencia la relevancia de acercarse a los conceptos científicos mediante una reconstrucción histórica. Esta aproximación facilita la revelación de sus orígenes a través de debates, experimentos, artículos e ideas que han transformado la percepción del mundo. De este modo, se anima a los estudiantes de la licenciatura en física de la Universidad Pedagógica Nacional a emplear la reconstrucción histórica como herramienta para abordar los conceptos científicos.

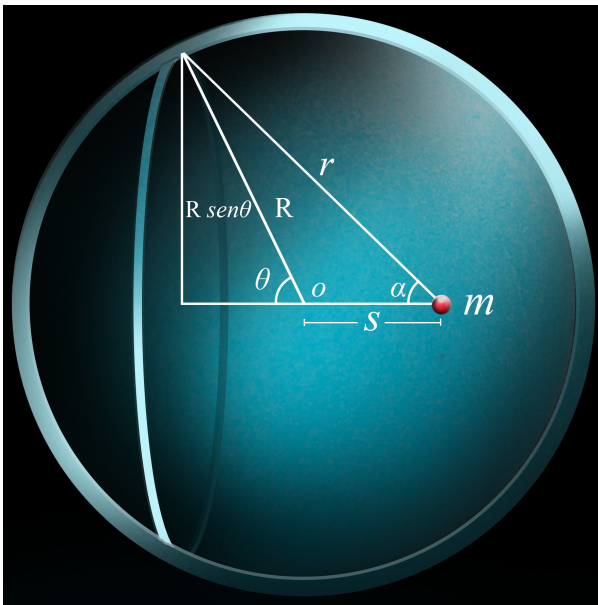
Bibliografía

- [1]. Assis, A. K. T. (1992). *Curso de Electrodinámica de Weber*.
- [2]. Berkson, W. (2008). *La teoría de campos de fuerzas desde Faraday hasta Einstein*. España: versión española de Luisa González Seco.
- [3]. Blanco, J. D. (2013). *Modelación del concepto de campo electromagnético: caracterización del razonamiento seguido por Maxwell*. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/20.500.12209/2071>.
- [4]. Cantor, D.A. (2020). *Introducción a la teoría de campo electromagnético desde una perspectiva histórica*. Tesis. Universidad Pedagógica Nacional.
- [5]. Coronado, W. A. (2015). *DE LA ACCIÓN A DISTANCIA AL CONCEPTO DE CAMPO: Una discusión sobre la acción a distancia en términos del desarrollo de la teoría de campos de Faraday hasta Maxwell*. Bogotá DC, Colombia: Departamento de Física - Universidad Pedagógica Nacional.
- [6]. Descartes, R. (1997). *Los principios de la filosofía*. Alianza Editorial S.A.
- [7]. Diaz, J. A. (2004). *El papel de las analogías en la creatividad de los científicos: La teoría del campo electromagnético de Maxwell como caso paradigmático de la historia de las ciencias*. Revista Eureka, 19.
- [8]. Escobar, L. J., González, Y., Gutiérrez, C. P. (2009). *Evolución del concepto de campo en estudiantes de nivel universitario*. Trabajo de grado de pregrado. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
- [9]. Faraday, Michael (2015). *Experimental Researches in Electricity, vol. III, p.p. 447-452*. Traducción libre realizada por Juan Carlos Orozco Cruz, Departamento de Física, Universidad Pedagógica Nacional.
- [10]. Feynman, R. P. (1965). *Lectures on Physics - Quantum Mechanics*. Addison - Wesley.
- [11]. Franklin, B. (2020). *Autobiografía de Benjamín Franklin*. Golden Keys Success.

- [12]. Hertz, H. (1990). *Ondas electromagnéticas*. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña.
- [13]. Henry, J. (2007). *ISAAC NEWTON Y EL PROBLEMA DE LA ACCIÓN A DISTANCIA*. Estudios de Filosofía, (35), 189-226.
- [14]. Leiva, S. M. (2022). *Sobre el fenómeno gravitatorio a través del diseño instruccional*. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/20.500.12209/18257>.
- [15]. Mahon, B. (2015). *The man who changed everything: The life of James Clerk Maxwell (1a ed.)*. John Wiley Sons.
- [16]. Maxwell, James Clerk (1861). *On physical lines of force*. King's College London.
- [17]. Maxwell, James Clerk. (1885). *On Faraday's lines of force*. King's College London.
- [18]. Maxwell, James Clerk (1864). *A dynamical theory of the electromagnetic field*. King's College London.
- [19]. Moreno, P. N. (2023). *Contextualización del concepto de campo como fundamento pedagógico introductorio a la teoría de campos en mecánica cuántica*. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/20.500.12209/18257>.
- [20]. Newton, I., Cohen, I. B. (1999). *The Principia: Mathematical Principles of Natural Philosophy*. Univ of California Press.
- [21]. Platón (1999). *Platón diálogo Timeo*. Alianza Editorial Colihue, Buenos Aires.
- [22]. Perea, M. A., y Buteler, L. M. (2016). *El uso de la historia de las ciencias en la enseñanza de la física: una aplicación para el electromagnetismo*. Góndola, Enseñanza y Aprendizaje de las Ciencias, 11(1), 12–25. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.gdla.2016.v11n1.a1>
- [23]. Romo, J., Universitat —de Barcelona. Departament de Lògica, Història i Filosofia de la Ciència. (1991). *El Concepto de estado electro-tónico en Faraday*. Universitat de Barcelona.
- [24]. Semanky, S. (1989). *Física, colección ciencia y tecnología*. Madrid: Aguilar.

- [25]. Serway, R. (1997). *Física*. México: McGrawHill.
- [26]. Torres A.K. (2021). *Wilhelm Weber's Main Works on Electrodynamics Translated into English*. Revista de investigación. Publicado en Canadá por Apeiron (Montréal, Québec).
- [27]. Vailati, E. (1997). *Leibniz and Clarke: A Study of Their Correspondence*. Oxford University Press.

A. Anexo: Fuerza de gravedad dentro de una esfera hueca



Se ubica una masa puntual m dentro de una masa esférica hueca de masa M y centro O , para encontrar la fuerza que produce M sobre m , se sugiere lo siguiente:

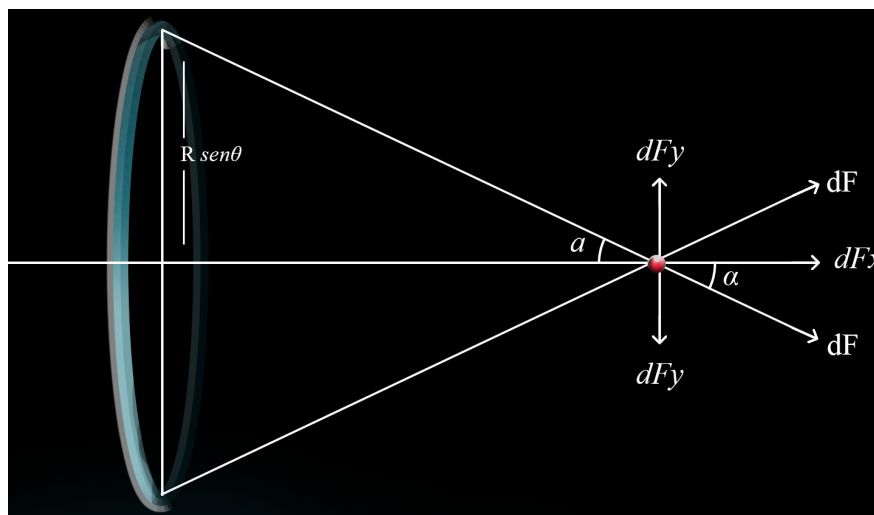
El problema se plantea, dividiendo en anillos delgados sobre la superficie de la esfera $A = 4\pi R^2$ y de densidad de masa $\sigma = \frac{M}{A}$.

Ahora la masa de un anillo dM esta dada por $dM = \sigma dA$

De modo que dA este dado por el producto de la anchura $Rd\theta$ y la circunferencia del anillo que será el radio $R \sin\theta$ y 2π así pues

$$dM = \sigma 2\pi R \sin\theta R d\theta \quad (\text{A-1})$$

Ahora observe la fuerza que ejerce el anillo sobre la masa puntual. Las componentes perpendiculares al eje horizontal se cancelan y solo quedan las componentes paralelas al eje horizontal que en este caso se suman. $dF_x = dF \cos\alpha$, según las leyes de newton.



$$\vec{F} = G \frac{Mm}{r^2} \hat{r} \quad (\text{A-2})$$

Entonces $dF = G \frac{mdM}{r^2} \cos \alpha$ y reemplazando A-1 en A-2

$$\vec{F} = 2\pi\sigma GmR^2 \int_0^\pi \frac{1}{r^2} \cos \alpha \sin \theta d\theta \quad (\text{A-3})$$

De la figura uno y usando la ley de los cosenos se tiene

$$r^2 = R^2 + s^2 - 2Rs \cos(\pi - \theta) = R^2 + s^2 + 2Rs \cos(\theta)$$

$$\text{y } 2rdr = -2sR \sin \theta d\theta$$

Donde

$$\sin \theta d\theta = -\frac{rdr}{sR} \quad (\text{A-4})$$

Por otro lado, en el triángulo que se forma teniendo en cuenta el ángulo α se obtiene

$$R^2 = r^2 + s^2 - 2rs \cos(\alpha)$$

$$\cos(\alpha) = \frac{r^2 + s^2 - R^2}{2rs} \quad (\text{A-5})$$

Es posible entonces poner la integral en términos solamente de dr añadiendo A-4 Y A-5 respectivamente a A-3. sus nuevos límites estarán dados por $\theta = 0$ $r^2 = R^2 + s^2 + 2Rs \cos(0) = R^2 + s^2 + 2Rs = (R + s)^2$ entonces $4r = R + S$ de la misma forma cuando $\theta = \pi$ entonces $r = R - S$

$$F = -2\pi\sigma GmR^2 \int_{R+s}^{R-s} \frac{r^2 + s^2 - R^2}{2rsr^2} \frac{rdr}{sR} \quad (\text{A-6})$$

Reorganizando A-6, para después evaluar la integral y sustituir sus respectivos límites tenemos

$$F = -\pi\sigma GmR \int_{R+s}^{R-s} \frac{r^2 + s^2 - R^2}{r^2} dr$$

$$F = \frac{-\pi\sigma GmR}{s^2} \left(r - (s^2 - R^2) \frac{1}{r} \right) \Big|_{R+s}^{R-s}$$

$$F = \frac{-\pi\sigma GmR}{s^2} \left[(R - S) - (R + S) - (s^2 - R^2) \left(\frac{1}{(R - S)} - \frac{1}{(R + S)} \right) \right] \quad (\text{A-7})$$

Se resuelve la suma de fracciones en A-7 para después cancelar con el término que está multiplicando $(s^2 - R^2)$ pues este se obtiene a partir de una diferencia de cuadrados.

$$F = \frac{-\pi\sigma GmR}{s^2} \left[-2s - (s^2 - R^2) \left(\frac{R + s - R + s}{(R - s)(R + s)} \right) \right]$$

$$F = \frac{-\pi\sigma GmR}{s^2} \left[-2s + (R^2 - s^2) \left(\frac{2s}{(R^2 - s^2)} \right) \right]$$

$$F = \frac{-\pi\sigma GmR}{s^2} [-2s + 2s] \quad (\text{A-8})$$

Finalmente note que $-2s + 2s = 0$ por lo que todo se cancela.

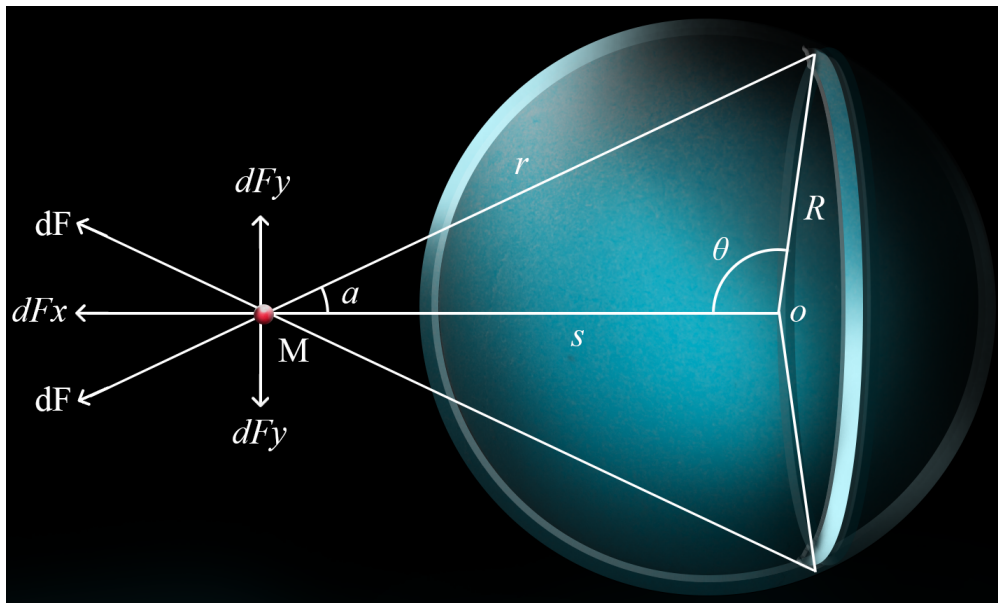
$$F = \frac{-\pi\sigma GmR}{s^2} [0]$$

$$F = 0 \quad (\text{A-9})$$

La fuerza de gravedad neta ejercida sobre una masa puntual, situada en el interior de una masa esférica hueca es exactamente cero.

B. Anexo: Fuerza de gravedad fuera de una esfera hueca

Se ubica una masa puntual m fuera de una masa esférica hueca de masa M , entonces para encontrar la fuerza que produce M sobre m se hace lo siguiente:



Este caso es similar al anterior, de nuevo se reduce el problema utilizando anillos de masa dM . La superficie de una esfera está dada por $4\pi R^2$, la densidad σ , entonces M será $M = \sigma 4\pi R^2$

Recuerde que $dM = \sigma 2\pi R \sin\theta R d\theta$, así de nuevo la integral quedaría expresada así:

$$F = -2\pi\sigma GmR^2 \int_0^\pi \frac{1}{r^2} \cos\alpha \sin\theta d\theta \quad (\text{B-1})$$

De la figura dos usando la ley de los cosenos se tiene

$$r^2 = R^2 + s^2 + 2Rs \cos\theta \quad \text{y} \quad 2r dr = -2sR \sin\theta d\theta$$

Donde

$$\sin \theta d\theta = -\frac{r dr}{sR} \quad (\text{B-2})$$

Por otro lado

$$R^2 = r^2 + s^2 - 2rs \cos(\alpha) \text{ entonces}$$

$$\cos(\alpha) = \frac{r^2 + s^2 - R^2}{2rs} \quad (\text{B-3})$$

Es posible entonces poner la integral en términos solamente de dr y sus nuevos límites estarán dados por cuando $\theta = 0$ $r^2 = R^2 + s^2 + 2Rs \cos(0) = R^2 + s^2 + 2Rs = (R + s)^2$ entonces $r = s + R$ de la misma forma cuando $\theta = \pi$ entonces $r = s - R$

Se sustituye B-2 y B-3 en B-1, además de poner los respectivos límites se obtiene

$$F = 2\pi\sigma GmR^2 \int_{s+R}^{s-R} \frac{r^2 + s^2 - R^2}{2rsr^2} \frac{r dr}{sR} \quad (\text{B-4})$$

Reorganizando la expresión y recordando que $\sigma = \frac{M}{4\pi R^2}$

$$F = \frac{GmM}{4Rs^2} \int_{s+R}^{s-R} \frac{r^2 + s^2 - R^2}{r^2} dr \quad (\text{B-5})$$

Se evalúa la integral de B-5 y se opera los términos de manera similar al anterior anexo, utilizando diferencia de cuadrados y cancelados términos se obtiene B-6

$$\begin{aligned} F &= \frac{GmM}{4Rs^2} \left[r - (s^2 - R^2) \frac{1}{r} \right] \Big|_{s-R}^{s+R} \\ F &= \frac{GmM}{4Rs^2} \left[(s-R) - (s+R) - (s^2 - R^2) \left(\frac{1}{(s-R)} - \frac{1}{(s+R)} \right) \right] \\ F &= \frac{GmM}{4Rs^2} \left[-2R - (s^2 - R^2) \left(\frac{s+R - s+R}{(s-R)(s+R)} \right) \right] \\ F &= \frac{GmM}{4Rs^2} \left[-2R - (s^2 - R^2) \left(\frac{2R}{(s^2 - R^2)} \right) \right] \end{aligned}$$

$$F = \frac{GmM}{4Rs^2} [-2R - 2R] \quad (\text{B-6})$$

Finalmente sumando $-2R - 2R$ se cancela el 4 y el R y se obtiene B-7

$$F = -\frac{GmM}{s^2} \quad (\text{B-7})$$

La fuerza de gravedad neta ejercida sobre una masa puntual, situada por fuera de una masa esférica hueca es directamente proporcional al producto de la masa total de la esfera hueca M por la masa puntual m , e inversamente proporcional a la distancia s que une sus centros.

C. Anexo: Demostración de la ley general de Weber

Para entender la relación del trabajo de Weber con los de Ampere y Coulomb, se puede hacer por medio de un acercamiento matemático, utilizando las ecuaciones de Lagrange. En principio se define el potencial generalizado:

$$U = U_1 - U_2 \quad (\text{C-1})$$

El primer término surge a partir de la ley electrostática de Coulomb (ecuación 2-3) expresada en forma de potencial eléctrico donde $U = - \int \vec{F} \cdot d\vec{r}$

$$U_1 = - \int \frac{1}{\epsilon_0 4\pi} \frac{Q_1 Q_2}{r^2} dr$$
$$U_1 = \frac{1}{\epsilon_0 4\pi} \frac{Q_1 Q_2}{r} \quad (\text{C-2})$$

Para el segundo término del potencial, que viene dado por la ley de Ampere (ecuación 2-4), θ_1 y θ_2 serán igual a $\pi/2$ y α será igual a 0. Esto quiere decir que, se tiene dos elementos de corriente paralelos y, como Weber considera los elementos de corriente como cargas que se mueven en sentidos opuestos con una misma velocidad, se tiene que $i_1 dl_1 = Q_1 \dot{r}$ y $i_2 dl_2 = Q_2 \dot{r}$ aplicando a la ecuación de Ampere se obtiene el segundo término del potencial.

$$F_e = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I_1 dl_1 \cdot I_2 dl_2}{r^2} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{Q_1 Q_2}{r^2} (\dot{r})^2 \quad (\text{C-3})$$

$$U_2 = - \frac{\mu_0}{2\pi} \int \frac{Q_1 Q_2}{r^2} (\dot{r})^2 dr$$

$$U_2 = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{Q_1 Q_2}{r} (\dot{r})^2 \quad (\text{C-4})$$

Ahora sustituyendo C-2, y C-4 a C-1 se obtiene el potencial generalizado y sacando factor común $\frac{Q_1 Q_2}{\varepsilon_0 4\pi}$ obtenemos

$$U = \frac{Q_1 Q_2}{\varepsilon_0 4\pi} \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{c^2} \frac{(\dot{r})^2}{r} \right) \quad (\text{C-5})$$

La constante c establece la relación entre el número de unidades electrostáticas de carga, la intensidad de corriente y el tiempo. Aunque en la época de Weber no se conocía la relación analítica entre el electromagnetismo y la luz, esta relación estaba implícita en la ecuación, pues la constante (c) resulta ser igual a la velocidad de la luz multiplicada por la raíz cuadrada de dos

$$c = \sqrt{\frac{2}{\mu_0 \varepsilon_0}}$$

Recuerde que las ecuaciones para la fuerza generalizada están dadas por:

$$Q_j = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial U}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial U}{\partial q_j} \quad (\text{C-6})$$

Ahora note que el potencial generalizado depende de $U(r, \dot{r})$ por lo que C-6 queda expresado como.

$$F_e = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial U}{\partial \dot{r}} \right) - \frac{\partial U}{\partial r} \quad (\text{C-7})$$

Derivando el potencial C-5 respecto a la coordenada generalizada \dot{r} se tiene

$$\frac{\partial U}{\partial \dot{r}} = \frac{Q_1 Q_2}{\varepsilon_0 4\pi} \frac{2\dot{r}}{r}$$

Luego se deriva respecto del tiempo utilizando regla del producto

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial U}{\partial \dot{r}} \right) = \frac{Q_1 Q_2}{\varepsilon_0 4\pi} \left(\frac{2}{c^2} \frac{\ddot{r}}{r} - \frac{2}{c^2} \frac{(\dot{r})^2}{r^2} \right) \quad (\text{C-8})$$

Derivando el potencial C-5 respecto a la coordenada generalizada r se tiene

$$-\frac{\partial U}{\partial r} = \frac{Q_1 Q_2}{\varepsilon_0 4\pi} \left(\frac{1}{r^2} + \frac{1}{c^2} \frac{(\dot{r})^2}{r^2} \right) \quad (\text{C-9})$$

Remplazando C-8 y C-9 en la ecuación C-7 se obtiene

$$F_e = \frac{Q_1 Q_2}{\varepsilon_0 4\pi} \left[\frac{2}{c^2} \frac{\ddot{r}}{r} - \frac{2}{c^2} \frac{(\dot{r})^2}{r^2} + \left(\frac{1}{r^2} + \frac{1}{c^2} \frac{(\dot{r})^2}{r^2} \right) \right]$$

Reorganizando la expresión

$$F_e = \frac{Q_1 Q_2}{\varepsilon_0 4\pi} \left[\frac{1}{r^2} - \frac{2}{c^2} \frac{(\dot{r})^2}{r^2} + \frac{1}{c^2} \frac{(\dot{r})^2}{r^2} + \frac{2}{c^2} \frac{\ddot{r}}{r} \right] \hat{r} \quad (\text{C-10})$$

Operando términos semejantes

$$F_e = \frac{Q_1 Q_2}{\varepsilon_0 4\pi} \left[\frac{1}{r^2} - \frac{1}{c^2} \frac{(\dot{r})^2}{r^2} + \frac{2}{c^2} \frac{\ddot{r}}{r} \right] \hat{r}$$

Sacando factor común $\frac{1}{r^2}$

$$F_e = \frac{Q_1 Q_2}{\varepsilon_0 4\pi r^2} \left[1 - \frac{(\dot{r})^2}{c^2} + \frac{2r}{c^2} \ddot{r} \right] \hat{r}$$

Finalmente, se obtiene la ley básica general de la acción eléctrica propuesta por Weber.

$$F_e = \frac{1}{\varepsilon_0 4\pi} \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \left[1 - \frac{1}{c^2} \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 + \frac{2r}{c^2} \frac{d^2 r}{dt^2} \right] \hat{r} \quad (\text{C-11})$$

D. Anexo: Demostración de la ley de inducción de Faraday – Lenz a partir de la ley de Weber

La siguiente demostración matemática (Assis, 1992, p.77), muestra cómo se puede explicar las leyes de inducción de Faraday desde la ecuación de Weber, para ello recuerde que la ley de la fuerza entre cargas de Weber se expresa como:

$$\vec{F}_{12} = \frac{1}{\varepsilon_0 4\pi} \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \left(1 - \frac{1}{c^2} \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 + \frac{2r}{c^2} \frac{d^2 r}{dt^2} \right) \hat{r} \quad (\text{D-1})$$

Recuerde que una corriente en un cable estacionario puede inducir una corriente en otro cable estacionario, solo mientras la corriente en el primero cambie en el tiempo, en ese sentido la primera parte correspondiente a las cargas estáticas es nula. A demás, solo en el primer cable cambiará la corriente por lo que la velocidad de las cargas y aceleración será diferente, entonces $\frac{d^2 r}{dt^2} = a$, $I_1 dl_1 = dq_1 v_1$ y $I_2 dl_2 = dq_2 v_2$, por lo que D-1 queda expresado como

$$\vec{F}_{12} = \frac{1}{\varepsilon_0 4\pi} \frac{Q_1 Q_2}{r^2 c^2} (-v_1 v_2 + 2ra) \hat{r} \quad (\text{D-2})$$

Por el segundo cable no pasa corriente, pues es en este dónde se quiere inducir corriente, por lo que $v_2 = 0$. A demás, las cargas serán infinitesimales, entonces la expresión D-2 queda como

$$d^2 \vec{F}_{12} = \frac{1}{\varepsilon_0 4\pi} \frac{dq_1 dq_2}{r^2 c^2} (2ra) \hat{r} \quad (\text{D-3})$$

La fuerza electromotriz (fem) puede ser expresada de la siguiente manera

$$d^2 fem = \left[\frac{d^2 \vec{F}_{12}}{dq_2} \right] \cdot d\vec{l}_2$$

Entonces dividiendo D-3 En dq_2 y multiplicando por $d\vec{l}_2$ se obtiene, además note que se canceló un $2r$

$$d^2 fem = \frac{1}{\epsilon_0 2\pi} \frac{dq_1 a}{rc^2} \hat{r} \cdot d\vec{l}_2 \quad (D-4)$$

Note que r depende de $r(dl_1, dl_2, t)$ y solo la corriente I_1 depende del tiempo por lo que en general, cuando varía la intensidad de la corriente en un conductor, lo que cambia es la velocidad de las cargas, pero no el número ni la densidad de la carga por lo que.

$$\frac{\partial I_1}{\partial t} d\vec{l}_1 = dq_1 a \hat{r} \quad (D-5)$$

Integrando sobre $d\vec{l}_1$ y $d\vec{l}_2$ introduciendo D-5 a D-4 y se sabe que $\mu_0 \epsilon_0 = \frac{2}{c^2}$ entonces

$$fem = \oint_{c1} \oint_{c2} \left(\frac{\mu_0}{4\pi r} \frac{\partial I_1}{\partial t} d\vec{l}_1 \cdot d\vec{l}_2 \right) \quad (D-6)$$

Aplicando la regla de la cadena para un doble producto se tiene que

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\mu_0}{4\pi r} I_1 d\vec{l}_1 \cdot d\vec{l}_2 \right) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{I_1}{r} d\vec{l}_1 \cdot d\vec{l}_2 \right)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{I_1}{r} d\vec{l}_1 \cdot d\vec{l}_2 \right) \\ &= \frac{\mu_0}{4\pi} \left[\frac{\partial I_1}{\partial t} \left(\frac{1}{r} d\vec{l}_1 \cdot d\vec{l}_2 \right) \right. \\ & \quad \left. + I_1 \left(\frac{\partial(d\vec{l}_1)}{\partial t} \cdot \frac{d\vec{l}_2}{r} + d\vec{l}_1 \cdot \left(\frac{\partial(d\vec{l}_2)}{\partial t} \frac{1}{r} - \frac{d\vec{l}_2}{r^2} \frac{\partial r}{\partial t} \right) \right) \right] \end{aligned} \quad (D-7)$$

Observe que los diferenciales de longitud no dependen del tiempo, es decir

$$\frac{\partial(d\vec{l}_1)}{\partial t} = \frac{\partial(d\vec{l}_2)}{\partial t} = 0$$

Aplicando esto a D-7 se anula el segundo y tercer termino por lo que quedaría

$$\frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{I_1}{r} d\vec{l}_1 \cdot d\vec{l}_2 \right) = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[\frac{\partial I_1}{\partial t} \left(\frac{1}{r} d\vec{l}_1 \cdot d\vec{l}_2 \right) - \frac{I_1}{r^2} \frac{\partial r}{\partial t} d\vec{l}_1 \cdot d\vec{l}_2 \right] \quad (D-8)$$

Se despeja el primer término de D-8 para sustituirlo en D-6

$$\begin{aligned} \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\partial I_1}{\partial t} \left(\frac{1}{r} \vec{dl}_1 \cdot \vec{dl}_2 \right) &= -\frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{I_1}{r} \vec{dl}_1 \cdot \vec{dl}_2 \right) - \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I_1}{r^2} \frac{\partial r}{\partial t} \vec{dl}_1 \cdot \vec{dl}_2 \\ fem &= \oint_{c1} \oint_{c2} \left(-\frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{I_1}{r} \vec{dl}_1 \cdot \vec{dl}_2 \right) - \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I_1}{r^2} \frac{\partial r}{\partial t} \vec{dl}_1 \cdot \vec{dl}_2 \right) \\ fem &= - \oint_{c1} \oint_{c2} \left(\frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{I_1}{r} \vec{dl}_1 \cdot \vec{dl}_2 \right) \right) - \oint_{c1} \oint_{c2} \left(\frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I_1}{r^2} \frac{\partial r}{\partial t} \vec{dl}_1 \cdot \vec{dl}_2 \right) \end{aligned} \quad (D-9)$$

Para el segundo termino de D-9 se puede expresar $\frac{\partial r}{\partial t} = v_1 \hat{r}$, por lo que entonces quedaría así

$$\frac{\mu_0}{4\pi} \oint_{c1} \left(\oint_{c2} \left(\frac{\hat{r}}{r^2} \vec{dl}_2 \right) \right) d\vec{l}_1 \quad (D-10)$$

Ahora utilizando la siguiente expresión $\frac{\hat{r}}{r^2} = -\nabla \left(\frac{1}{r} \right)$ en D-10

$$\frac{\mu_0}{4\pi} \oint_{c1} v_1 \left(\oint_{c2} - \left(\nabla \left(\frac{1}{r} \right) \cdot \vec{dl}_2 \right) \right) d\vec{l}_1$$

Utilizando el teorema de Stokes para la integral respecto a la curva $c2$

$$\oint_{c2} - \left(\nabla \left(\frac{1}{r} \right) \cdot \vec{dl}_2 \right) = - \iint_s \nabla \times \nabla \left(\frac{1}{r} \right) \cdot d\vec{s}_2 \quad (D-11)$$

Por las propiedades del rotacional se tiene que $\nabla \times \nabla(\varphi) = 0$ aplicado esto a D-11

$$- \iint_s \nabla \times \nabla \left(\frac{1}{r} \right) \cdot d\vec{s}_2 = - \iint_s 0 \cdot d\vec{s}_2 = 0$$

Esto quiere decir que D-10 es nulo por lo que

$$\frac{\mu_0}{4\pi} \oint_{c1} \left(\oint_{c2} \left(\frac{\hat{r}}{r^2} \vec{dl}_2 \right) \right) d\vec{l}_1 = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_{c1} (0) d\vec{l}_1 = 0$$

Ahora bien, para la ecuación de la fem (D-9) el único termino para tener en cuenta es el primero. Se puede sacar $\frac{\partial}{\partial t}$ de la integral ya que como se dijo anteriormente los diferenciales de longitud no dependen del tiempo, Con todo esto D-9 quedaría expresado como,

$$fem = -\frac{d}{dt} \left(\oint_{c_2} \left[\frac{\mu_0}{4\pi} I_1 \oint_{c_1} \left(\frac{d\vec{l}_1}{r} \right) \right] d\vec{l}_2 \right) \quad (D-12)$$

Entonces podemos expresar la ecuación D-12 en términos del vector potencial magnético \vec{A} pues este está dado por:

$$\vec{A} = \frac{\mu_0}{4\pi} I_1 \oint_{c_1} \left(\frac{d\vec{l}_1}{r} \right)$$

Entonces D-12 quedara expresada como

$$fem = -\frac{d}{dt} \left(\oint_{c_2} \vec{A} \cdot d\vec{l}_2 \right)$$

Usando el teorema de Stokes nuevamente

$$-\frac{d}{dt} \left(\oint_{c_2} \vec{A} \cdot d\vec{l}_2 \right) = -\frac{d}{dt} \left(\int_s \vec{\nabla} \times \vec{A} \cdot d\vec{s} \right) \quad (D-13)$$

El campo magnético puede ser expresado como $\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A}$ y D-13

$$fem = -\frac{d}{dt} \left(\int_s \vec{B} \cdot d\vec{s} \right)$$

Finalmente, como el flujo magnético esta dado por $\Phi_B = \int_s \vec{B} \cdot d\vec{s}$ se obtiene la ley de inducción de Faraday - Lenz

$$fem = -\frac{d\Phi_B}{dt} \quad (D-14)$$

E. Anexo: Demostración vectorial corrientes de desplazamiento y ondas electromagnéticas

El objetivo de Maxwell era poder encontrar las ecuaciones de campo que ya había encontrado con el modelo de vórtices, para ello por intuición, y por el hecho de que muchos experimentos lo corroboraban decidió que algunas ecuaciones son fundamentales, como la ley de Faraday:

$$\mu_0 \frac{d\vec{H}}{dt} = \nabla \times \vec{E} \quad (\text{E-1})$$

También las leyes de Gauss para la electricidad y magnetismo

$$\nabla \cdot (\vec{B}) = 0 \quad (\text{E-2}) \quad \nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (\text{E-3})$$

Además, para poder explicar la electrodinámica también debería estar la ley de Ampere, que para ese entonces se escribe así:

$$\nabla \times \vec{H} = 4\pi\vec{J} \quad (\text{E-4})$$

Otra de las ecuaciones más importantes era la que implicaba la conservación de la carga, este principio de conservación está dado por la relación de continuidad, esta establece que cuando se quiere medir el flujo de corriente, esta estará dado por la variación de la cantidad de cargas que se mueven o varían en el tiempo y se expresa así:

$$\nabla \cdot (\vec{J}) = \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (\text{E-5})$$

Ahora note que sucede algo incoherente al aplicar el operador divergencia a la ecuación E-4

$$\nabla \cdot (\nabla \times \vec{H}) = \nabla \cdot (4\pi\vec{J}) \quad (\text{E-6})$$

La parte izquierda de E-6 debe ser igual a 0 ya que según las propiedades vectoriales la divergencia aplicada al rotacional de cualquier campo vectorial siempre será 0, pero esto no concuerda con el principio de continuidad, ya que como se observó en E-5 la divergencia de la

corriente no es 0. Para resolver esto, Maxwell añadió otro termino de densidad de corriente, llamado densidad de corrientes de desplazamiento, así pues, la ecuación E-4 estará dada por

$$\nabla \times \vec{H} = 4\pi\vec{J} + \vec{J}_d \quad (\text{E-7})$$

Para poder encontrar a que será igual el nuevo termino añadido, solo hace falta derivar con respecto al tiempo en ambos lados de E-3

$$\nabla \cdot \left(\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) = \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (\text{E-8})$$

Ahora con esto es posible igualar E-8 con la ecuación de continuidad E-5

$$\nabla \cdot \left(\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) = \nabla \cdot \vec{J}$$

Lo que implica que

$$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \vec{J} \quad (\text{E-9})$$

Para que no vuelva a suceder el problema con E-6, necesariamente E-9 debe ser

$$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \vec{J}_d$$

Es decir, ahora la ecuación E-7 estará dada por

$$\nabla \times \vec{H} = 4\pi\vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{E-10})$$

Maxwell demostró las Corrientes de desplazamiento sin usar su modelo de vórtices, sin embargo, aún falta mostrar las ondas electromagnéticas, que esta fue el resultado de encontrar una relación para la rigidez y elasticidad de los vórtices, para poder encontrar la relación con las ondas, se puede ver que las ecuaciones de Maxwell en el vacío. En principio se escribe las cuatro ecuaciones en términos de los campos \vec{E} y \vec{B} , la ley de Faraday quedara expresada como

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{E-11})$$

Como en el vacío no hay densidad de corriente las leyes de gauss para la electricidad y magnetismo serán

$$\nabla \cdot (\vec{B}) = 0 \quad (\text{E-12}) \qquad \nabla \cdot \vec{E} = 0 \quad (\text{E-13})$$

Y finalmente la ley de ampere-Maxwell

$$\nabla \times \vec{B} = \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (\text{E-14})$$

Ahora se aplica el operador rotacional a ambos lados de E-11

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = \nabla \times \left(-\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right) \quad (\text{E-15})$$

Luego se puede utilizar la siguiente identidad vectorial en E-14 $\nabla \times (\nabla \times \vec{A}) = \nabla(\nabla \cdot \vec{A}) - \nabla^2 \vec{A}$

$$\nabla(\nabla \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E} = \nabla \times \left(-\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right) \quad (\text{E-16})$$

De E-13 se sabe que $\nabla \cdot \vec{E} = 0$ entonces E-16 queda como

$$-\nabla^2 \vec{E} = \nabla \times \left(-\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right)$$

Reorganizando

$$\nabla^2 \vec{E} = \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \vec{B})$$

Lo que está en el paréntesis se puede reemplazar por medio de E-14

$$\nabla^2 \vec{E} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right)$$

Reorganizando

$$\nabla^2 \vec{E} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \tag{E-17}$$

Esta es la ecuación de onda electromagnética para el campo eléctrico de manera similar se puede llegar a la ecuación de onda del campo magnético de esta manera se encuentra que la velocidad de dichas ondas estará dada por

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$$