

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO



FACULTAD DE CIENCIAS

Campo electromagnético y corriente eléctrica: un
análisis de los libros de texto y su relación con las
ideas previas de los estudiantes.

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
F I S I C A
P R E S E N T A

Cynthia Esperanza Lima González

Director de Tesis: Dr. Fernando Flores Camacho



FACULTAD DE CIENCIAS
UNAM

2004



FACULTAD DE CIENCIAS
SECCION ESCOLAR



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: Lima González Cynthia Esperanza

FECHA: 26/11/2010

FIRMA:

ACT. MAURICIO AGUILAR GONZÁLEZ
Jefe de la División de Estudios Profesionales de la
Facultad de Ciencias
Presente

Comunicamos a usted que hemos revisado el trabajo escrito:

"Campo electromagnético y corriente eléctrica: un análisis de los libros de texto y su relación con las ideas previas de los estudiantes"

realizado por Lima González Cynthia Esperanza

con número de cuenta 09757194-2 , quien cubrió los créditos de la carrera de: Física

Dicho trabajo cuenta con nuestro voto aprobatorio.

Atentamente

Director de Tesis

Propietario Dr. Fernando Flores Camacho

Propietario Dr. Eugenio Ley Koo

Propietario Dra. María de los Angeles Ortíz Flores

Suplente Dr. Mayo Villagrán Muniz

Suplente Dra. María del Pilar Segarra Alberú

Consejo Departamental de Física

DRA. PATRICIA GOLDSTEIN MENACHE
Coordinadora del Licencatura
DÉPARTAMENTO DE FÍSICA

Índice

1. Introducción	1
2. Orígenes de la corriente eléctrica	5
2.1 Los principios de la electrostática	6
2.2 El desarrollo de las propiedades de la electrostática	10
2.3 La jarra de Leyden	13
2.4 Los experimentos de Galvani	15
2.5 Modelos de corriente utilizados en los siglos XVII y XVIII	17
3. De la pila de Volta a la teoría de Lorentz	19
3.1 Los principios de la corriente eléctrica.	20
3.2 Magnetismo: un efecto de la corriente eléctrica	22
3.3 La teoría de Ampère	24
3.4 Faraday	26
3.4.1 Faraday: electricidad y corriente eléctrica	27
3.4.2 Faraday: la propagación de las fuerzas	30
3.4.3. Faraday: las líneas de fuerza	37
3.5. Ohm y Thomson	42
3.6. Maxwell	46
3.6.1. Electricidad: corriente eléctrica	46
3.6.2. Magnetismo	50
3.6.3. Modelos mecánicos del éter	53
3.6.4. La corriente de desplazamiento	57
3.6.5. Modelo de campo	59
3.7. Los seguidores de Maxwell	62
3.8. El desarrollo de la teoría de campo en la época de Lorentz	65
3.8.1. Concepto de campo electromagnético	66
3.8.2. Concepto de corriente eléctrica	70
3.9. Herramientas, modelos de campo y corriente utilizados en la época	72

3.9.1. Campo eléctrico	72
3.9.2 Corriente eléctrica	75
3.10. La Física Moderna y el desarrollo de los conceptos de campo y corriente	77
3.10.1. Einstein	77
3.10.2. La corriente eléctrica y la teoría de electrones	82
3.11. Modelos de campo y corriente eléctrica utilizados en los siglos XVI – XX	83
4. Relación de las ideas previas y los libros de texto	89
4.1. Las ideas previas y los libros de texto	90
4.2. Las ideas previas y la historia	94
4.3. Principales ideas previas en electromagnetismo	95
4.3.1. Principales ideas previas en el tema de corriente eléctrica	96
4.3.2. Principales ideas previas en el tema de campo eléctrico y magnético	100
4.4. Análisis jerárquico de los principales conceptos de los alumnos	104
4.4.1. Categorización de las ideas previas de corriente eléctrica en bachillerato	107
4.4.2. Categorización de las ideas previas de corriente eléctrica en universidad	110
4.4.3. Categorización de las ideas previas de campo eléctrico y magnético en universidad	112
4.4.4. Categorización de las ideas previas de campo eléctrico y magnético en bachillerato	116
5. Análisis del concepto de campo y corriente eléctrica en diez libros de texto de nivel universitario	119
5.1. Antecedentes	120
5.2. Análisis de los textos universitarios de Física	123
5.2.1. Presentación	123
5.2.2. Evolución de los conceptos de la Física, Arons, A.	128
5.2.3. Physics for the inquiring mind, Rogers, E.	139

5.2.4. Beyond the mechanical universe, Olenick, R., Apostol, T. & Goodstein,	150
5.2.5. Principles & Applications, Lorrain, P. & Corson, D.	160
5.2.6. Electricity & Magnetism, Purcell, M.	165
5.2.7. Halliday, D., Resnick, R. & Krane, K., Física vol. 2	177
5.2.8. Física vol. II Campos y Ondas, Alonso, M. & Finn, E.	186
5.2.9. Electricidad y Magnetismo, Riveros, H.	193
5.2.10. Fundamentos de la teoría electromagnética, Reitz, J., Milford, F. & Christy, R.	197
5.2.11. Classical Electromagnetic Theory, Vanderlinde, J.	207
5.3. La historia, los textos y las ideas previas	210
6. Propuesta	219
6.1. Reinders Duit: un modelo de reconstrucción educativa	220
6.2. Aplicación del modelo de reconstrucción educativa	222
6.3. Conceptos clave para la enseñanza del campo electromagnético y la corriente eléctrica	223
6.3.1. Conceptos clave en el desarrollo del campo electromagnético y la corriente eléctrica	223
6.3.2. Conceptos clave en la presentación del campo electromagnético y la corriente eléctrica	229
6.3.3. Relación entre los conceptos claves para la enseñanza del campo electromagnético y la corriente eléctrica, y las ideas previas	234
6.3.4. Contextos adecuados para la enseñanza del campo electromagnético y la corriente eléctrica	239
7. Conclusiones	242
8. Referencias	247
Anexo 1 Conceptos de campo eléctrico y magnético	A-1
Anexo 2 Concepto de corriente eléctrica	A-13

1. Introducción

Los temas de campo electromagnético y corriente eléctrica han concentrado la atención de muchos científicos. Esto se debe a que sus efectos son por un lado de gran aplicación tecnológica, y por el otro que su comprensión es esencial para el estudio de una multitud de fenómenos físicos.

Estos temas, ocupan un espacio importante dentro del plan de estudios de la carrera de física y algunas ingenierías. Investigaciones realizadas sobre las ideas previas de los estudiantes, muestran que son temas de difícil comprensión para los estudiantes (Greca, I. & Moreira, M., 1998). Ello se ve reflejado en las ideas previas sobre campo eléctrico y magnético y corriente eléctrica de los estudiantes, reportadas en dichas investigaciones. Una de las razones de la dificultad que presentan los estudiantes en el aprendizaje de los temas, es el tipo de textos utilizados. Esto se debe a que la mayoría de las veces, los textos no proveen los elementos suficientes y necesarios para que el alumno tenga una buena comprensión de los temas (Dall'Alba, G., Walhs, E., Bowden, J., Martin, E., Masters, G., Ramsden, P. & Stephanou, A., 1993).

Para contribuir a resolver este problema educativo, la presente tesis gira en torno a los conceptos de los campos eléctrico y corriente eléctrica; analizando primero los elementos históricos que permitieron a los científicos formular dichos conceptos, para después realizar un análisis de la forma en que presentan ambos contextos diez libros de texto a nivel universitario, finalizando con una propuesta acerca de los conceptos clave en la enseñanza del campo y corriente eléctrica, y la secuencia en el aprendizaje.

La historia de la formación de los conceptos es tomada en cuenta debido a la correspondencia parcial entre la historia y las ideas previas de los alumnos (Wiser & Carey, 1983), y como una base para la comparación entre el establecimiento de los conceptos a lo largo de la historia y en los libros de texto: los experimentos, experiencias y discusiones que ayudaron y que son considerados o dejados de lado por los libros de texto.

El recorrido histórico sobre la evolución de los conceptos mencionados inicia en el siglo

XVII con el trabajo de Gilbert, pasando por las propuestas de Faraday, Maxwell y Lorentz entre otros, finalizando con la conceptualización propuesta por Einstein.

Durante esta parte se resaltarán la evolución que los conceptos de campo y corriente han tenido desde sus orígenes, así como los cambios que han presentado; sobre todo con el descubrimiento del electrón y el desarrollo de la teoría de la relatividad. Así mismo, se destacan las concepciones más relevantes de los científicos; esto es, aquellas que tuvieron mayor influencia durante la época en que fueron expresadas; situadas claro, en el contexto que llevó a su formación y aquel que influyó en su cambio.

Este recorrido me permitirá presentar varios aspectos en la formación de los conceptos a tratar. Entre otros se encuentran:

1. La influencia que tiene la experimentación en la formación del concepto.
2. Los modelos utilizados para la explicación de los fenómenos físicos.

Es importante resaltar que la historia de la ciencia, en especial de la física ha acaparado la atención de los investigadores en los últimos años. Esto se debe a varias razones: la primera de ellas, es que la historia puede servir como fuente de información que prepare a los maestros a esperar ideas previas en sus alumnos (Benseghir, 1989; Wandersee, 1985). Así, en aquellas situaciones en las que los científicos presentaban argumentos y teorías contradictorias, puede esperarse ideas previas de los alumnos (Wiser and Carey, 1983; Sequeira & Leite, 1991; Whiteley, 1993). Un claro ejemplo de ello, es la idea de éter sugerida por Faraday y sostenida por Maxwell y Lorentz, entre otros, y que fue erradicada por Einstein. Dicha idea es mantenida por los estudiantes hoy en día (Bar, V., Zinn, B. & Rubin, E., 1997).

En segundo lugar, el análisis histórico ha permitido observar que el nivel de conceptualización de los estudiantes es similar a aquel que presentaban los científicos al iniciar el desarrollo de la teoría electromagnética (Serouglou, F. & Koumaras, P., 2001).

Ahora bien, a pesar de los cambios sufridos por los conceptos de campo y corriente a través del tiempo, algunas concepciones que en su momento fueron poseídas por algunos científicos y utilizadas para el desarrollo de la teoría electromagnética, son reflejadas actualmente por los libros de texto.

Es importante mencionar que dichas concepciones son erróneas; lo cual propicia un

aprendizaje poco adecuado de los conceptos de campo y corriente. Sin embargo, no sólo la presencia de las concepciones o modelos erróneos en los libros de texto obstaculiza el aprendizaje de los alumnos, sino también el mal planteamiento que se hace de los modelos o simplemente la falta de discusión o material sobre el tema. Por esta razón, la segunda parte de la tesis corresponde a un análisis de la forma en que los textos a nivel superior manejan los conceptos de campo electromagnético y corriente eléctrica.

Los textos analizados en la segunda parte, se eligieron con base en los programas de Electromagnetismo I y Electromagnetismo II del nuevo plan de estudios de la carrera de Física de la Facultad de Ciencias, de la Universidad Nacional Autónoma de México. Además de estos, se consideraron tres libros de carácter introductorio, cuya presentación difiere de los propuestos por el plan de estudios; con el afán de tener una diversidad en cuanto a textos y forma de presentar los conceptos.

Además de analizar las herramientas que brindan los textos para una formación de los conceptos, se presenta, para cada uno, aquellas concepciones de los estudiantes que pueden ser cambiadas mediante el apoyo del texto. También, es importante resaltar el punto en el que se detalla la forma en que cada libro hace uso de la historia. Con ello, se establece una relación entre los textos, las ideas previas de los estudiantes y la historia.

El análisis histórico descrito anteriormente, permite considerar los elementos que llevaron a los científicos de la época a formular los conceptos, de forma que podamos tener una visión clara del proceso de construcción de ellos. Este análisis, aunado al de los libros de texto y su relación con las ideas previas de los estudiantes, lleva al esbozo de una propuesta para la enseñanza de los conceptos de campo electromagnético y corriente eléctrica.

La propuesta, gira en torno al modelo de reconstrucción educativa de Duit (2001). De él se rescatan algunos pasos, entre los que se encuentran la selección de los conceptos clave para la enseñanza y el establecimiento de las relaciones existentes entre ellos. Estos pasos, nos ayudarán en la construcción de un esquema de enseñanza de los conceptos de campo y corriente eléctrica, mediante el cual se podrá atacar algunos de los problemas conceptuales de los estudiantes.

Por último se dan algunas sugerencias para la enseñanza de los conceptos. Estas pretenden proveer ayuda para manejar de forma adecuada la historia, indicando los aspectos que deben resaltarse del contenido histórico, así como otros aspectos de importancia que deben ser considerados. Un ejemplo de esto, es tomar en cuenta las ideas previas para la selección del contenido histórico a enseñar, y determinar la extensión del contenido tanto temático como histórico, atendiendo a las necesidades y problemas conceptuales de los estudiantes.

2. Orígenes de la corriente eléctrica

La corriente eléctrica tiene un papel fundamental en el desarrollo de las propiedades y la descripción de los campos magnético y eléctrico. Esto se debe principalmente a que muchos fenómenos del magnetismo están ligados a ella, tal y como la inducción electromagnética. De estos fenómenos hablaré en los siguientes capítulos.

Para comprender la formación del concepto de corriente eléctrica, es necesario remontarnos al siglo XVII, ya que a pesar de que desde la antigüedad los seres humanos se habían cuestionado sobre las propiedades magnéticas y eléctricas de los cuerpos, no es sino hasta este siglo que las investigaciones se realizan de forma continua y se desarrolla el estudio de la electricidad.

Durante los primeros estudios, los científicos pensaban que los efectos magnéticos y eléctricos estaban relacionados: tanto la magnetita como el ámbar eran capaces de atraer objetos. Esta característica unió los estudios de magnetismo y electricidad los primeros años, pero después se separaron en estudios independientes. Por otro lado, junto a los experimentos que dieron lugar a la corriente eléctrica, se iniciaron aquellos que formarían los antecedentes en la investigación del campo magnético.

Los orígenes de la corriente eléctrica se encuentran en las investigaciones sobre electrostática. De acuerdo con Heilbron¹, estas investigaciones se dividen en cuatro periodos que comprenden desde el siglo XVII hasta finales del siglo XVIII. El primer período comprende el s. XVII, el segundo los años de 1700 a 1740, el tercero de 1740 a 1760, y el cuarto de 1760 a 1790. A continuación daré una reseña de cada uno de ellos.

¹ Heilbron, J. Elements of Modern Physics, p. 159.

2.1. Los principios de la electrostática

Durante el primer período que abarca el siglo XVII, los jesuitas fueron los que mantuvieron vivas las investigaciones en el campo de la electrostática. Este periodo se caracteriza por la distinción entre los efectos eléctricos y los magnéticos. Fue William Gilbert (1544 – 1603) quien estableció que la naturaleza de la electricidad no era una propiedad innata de los objetos como lo era el magnetismo. Por el contrario, la electricidad era generada al frotar los objetos o efectuar alguna acción sobre ellos. De esta forma, logró establecer la diferencia entre los efectos de la magnetita y el ámbar: “..las causas de los movimientos de la magnetita son muy diferentes de aquellas que le dan al ámbar sus propiedades... En otros cuerpos se ve un considerable poder de atracción, el cual difiere del de la magnetita, - en el ámbar, por ejemplo”².

La distinción que estableció Gilbert entre estos dos fenómenos se basaba en el tipo de material. Dado que la Tierra estaba formada básicamente de dos tipos de materia, la primera era fluida y húmeda, la segunda firme y seca; todos los cuerpos estaban igualmente constituidos de estos dos tipos de materia. Así, los materiales que se hubieran formado de fluidos o materia húmeda se comportarían como el ámbar al ser frotados. Ya que estos materiales nunca habían perdido esta fluidez por completo, al ser frotados emitían una efluvia que jalaba a las pequeñas partículas hacia el objeto. De esta forma, los objetos eran atraídos por la efluvia. Dicha atracción entre dos objetos se debía a que:

“un aliento, que procede de un cuerpo es una mezcla de humedad o un fluido acuoso, alcanza el cuerpo que va a ser atraído, y tan pronto es alcanzado es unido al eléctrico atrayente; y un cuerpo en contacto por otro cuerpo por la radiación peculiar de efluvia hace de los dos objetos uno: unidos, los dos se encuentran en armonía, y eso es lo que significa la atracción.”³

La efluvia solamente podía ser “liberada” por los objetos al frotarlos con otros que no dañaran la superficie y lograra hacerlos brillar, como la seda o telas de lana; además de que al frotarlos alcanzaban cierta temperatura, lo cual era una de las condiciones para la emanación de la efluvia. Una de las propiedades de la efluvia es que no hacía que los objetos se repelieran, mientras que en el magnetismo polos iguales se repelían.

² Gilbert, W. De Magnete, p. 75.

³ Ibidem, p. 91.

De aquí que la naturaleza de la atracción eléctrica, fuera un “fluido” que se encargaba de unir los dos cuerpos. Sin embargo, no todos los objetos poseían esta atracción; Gilbert recalcó la existencia de objetos que aun al frotarlos, no lograban atraer a ningún otro, tal y como la ebonita, el coral, las perlas, etc.; incluso, la magnetita aunque fuera un material que se podía pulir fácilmente, carecía de dicha atracción. A estos materiales les llamó anaeléctricos, y la razón por la que no poseían la atracción eléctrica, era, según Gilbert, que aunque algunos de ellos eran cuerpos formados de fluidos o materia húmeda, tenían cierto tipo de impurezas, tales como rocas, metales, etc.

Una vez hecha la distinción entre los dos fenómenos, Gilbert explicó el origen tanto de los movimientos eléctricos como de los magnéticos –entendiendo por movimientos, la electricidad y el magnetismo-. Los movimientos eléctricos provenían de la materia y los magnéticos de la forma de los objetos. Los movimientos eléctricos estaban confinados en una prisión:

“en donde hay que despertar la fuerza por la fricción hasta que la sustancia alcance un calor moderado, y libere una efluvia, y su superficie brille. Si se le sopla aire desde la boca o una corriente de aire húmedo de la atmósfera, los poderes eléctricos son interferidos; y si una hoja de papel y una tela de lino es interpuesta, entonces no hay movimiento eléctrico. Pero la magnetita, aunque sea frotada o calentada... y esté en agua o aire, atrae objetos magnéticos.”⁴

Con ello, Gilbert establece la influencia del medio tanto en la atracción eléctrica como en la magnética, siendo que la eléctrica era más fácil de modificar, mientras que la magnética, aún y cuando algo se interpusiera entre la magnetita y el objeto atraído la atracción entre ambos objetos permanecía.

Otra de las diferencias que estableció Gilbert entre la atracción eléctrica y magnética, era que esta última podía levantar pesos grandes, mientras que objetos eléctricos atraían cosas muy ligeras. Gilbert comparó la magnetita con la Tierra, ambas tenían polos, un ecuador y, además, tenían casi la misma forma. Esta comparación lo llevó al establecimiento del comportamiento de la aguja de la brújula en presencia de la magnetita, así como en las variaciones que podría sufrir si se modificaba el tamaño o la posición de la magnetita.

Además de todas estas propiedades, la magnetita no necesitaba emitir una efluvia para atraer a los objetos; antes bien, estaba rodeada de una esfera de virtud que se extendía

⁴ Gilbert, W. De Magnete, p. 85.

en todas direcciones. Con el establecimiento de esta esfera de influencia, Gilbert dejaba de lado el concepto de acción a distancia, al igual que lo hizo con la suposición de la existencia de la efluvia.

La esfera de virtud, era desplegada por los cuerpos magnéticos debido a lo que Gilbert llamó **vigor innato**, un potencial magnético que correspondía a la **energía primaria**. La energía primaria era poseída por la Tierra, al igual que por el Sol y la Luna.

Debido a que la naturaleza de la atracción eléctrica y la cohesión magnética demostraban ser diferentes, como se mencionó anteriormente, Gilbert, estaba convencido de que una efluvia no era necesaria para la cohesión magnética, antes bien, la cohesión era un acuerdo mutuo entre los objetos.

"Para él, la cohesión magnética era una acción mutua entre el cuerpo atrayente y el cuerpo atraído..... porque los movimientos magnéticos no resultaban de la atracción de un cuerpo sólo sino de la unión simultánea de dos cuerpos armoniosamente.."⁵

De esta forma, "tan pronto como el metal entra en la esfera de influencia de la magnetita,...el metal cambia instantáneamente, y su forma se ve renovada, antes era inactiva e inerte, ahora es rápida y activa... Entonces la cohesión magnética es el acto de la magnetita y el metal, no solamente de alguno de los dos solos.."⁶

La magnetita no atraía los metales con la misma fuerza en cada punto; ya que tenía puntos en los que su energía era mayor como en los polos⁷. Así, los puntos cerca de los polos atraían a los objetos con más fuerza y mientras más alejados de los polos los atraían con menor fuerza. Su fuerza magnética se propagaba en todas direcciones alrededor de la magnetita, sino de una forma totalmente esférica, al menos de una forma casi regular. Sin embargo, esta esfera de influencia (como Gilbert llamó al campo magnético generado por un imán) era limitada, es decir, se extendía hasta cierta distancia.

Para Gilbert, al igual que para los filósofos antiguos, la fuerza magnética era algo animado o imitaba a un alma:

"Pero la fuerza magnética de la tierra y el alma o la forma animada de los planetas, que no tienen sentidos, pero sin error y sin heridas de enfermedades y padecimientos, ejerce una acción sin fin, rápida, definida, constante..."⁸

El primer físico después de Gilbert en realizar investigaciones sobre la electricidad, fue el

⁵ Coulston, C. Dictionary of Scientific Biography, vols. 3 y 4. p. 398.

⁶ Gilbert, W. De Magnete, p. 110.

⁷ Gilbert refiere en su libro De Magnete, la energía de un imán, sin especificar lo que para él significaba el término de energía.

⁸ Gilbert, W. De Magnete, p. 311.

jesuita Niccolò Cabeo (1596 – 1650). Él estableció la imposibilidad de la conducción eléctrica, al afirmar que el ámbar no podía transferir su “poder” de atracción, mientras que un imán sí. Por otro lado, reafirmó la hipótesis de Gilbert sobre la no-existencia de la repulsión entre materiales eléctricos. De acuerdo con Gilbert, la efluvia adelgazaba el aire alrededor del objeto eléctrico permitiendo un vacío; de esta forma, la brisa llevaba la atracción al otro cuerpo. Algunas veces la brisa era tan fuerte que los cuerpos atraídos eran rebotados. Es así como se explicaba la repulsión entre objetos cargados eléctricamente, sin embargo, no lo reconocía como una repulsión sino como un efecto secundario de la acción de la efluvia.

Durante esta etapa se realizaron importantes experimentos. Uno de ellos fue el propuesto por Cabeo, en el cual probaría que la acción eléctrica no podría llevarse a cabo en el vacío. Para ello, utilizó el vacío creado en el espacio sobre el mercurio del barómetro de Torricelli. En este espacio introdujo un pedazo de ámbar, uno de caucho (resina) y algunos de papel. A pesar de todos los esfuerzos, y cualquiera que fuera el recipiente lleno o no de aire, el ámbar no atraía.

Este periodo terminó con los experimentos de Otto von Guericke (1602 – 1686) y Christian Huygens (1629 – 1695). El primero de ellos, demostró la conducción eléctrica, uniendo dos esferas -una de ellas electrificadas- mediante un hilo, de esta forma, también afirmó que la atracción no se llevaba a cabo por la intervención del aire, ya que la virtud, como era llamada la electricidad, podía pasar de un lado a otro mediante un hilo. Huygens repitió el experimento de Guericke utilizando una esfera de ámbar. A dicha esfera dejaba caer pedazos de lana, unos secos y otros mojados. Los dos tipos de pedazos eran atraídos por la esfera de ámbar, aunque los mojados se separaban de ella después de un tiempo. También demostró que dos pedazos de lana se repelían después de haber sido puestos en contacto con el ámbar.

A lo largo de éste primer período, surge el concepto de la electricidad como una brisa que sale de los objetos al ser frotados; a esta brisa se le nombra efluvia. Esta efluvia podía o no necesitar el aire como su medio conductor. También se hacen experimentos en los que se puede trasladar la efluvia de un lado a otro, por medio de un hilo conductor.

2.2. El desarrollo de las propiedades de la electrostática

El segundo periodo que abarca desde el año 1700 hasta el 1740, se caracterizó por los experimentos de electrostática y descubrimientos de sus propiedades. Este periodo empezó con los experimentos de Huygens y con la generalización de la experimentación de la electrostática en las universidades.

Francis Hauksbee (1666 – 1713), un instrumentista y especialista en vacío, fue el encargado de renovar la experimentación en la sociedad de Londres a principios del siglo XVII. Tratando de mejorar los experimentos que daban explicación al brillo que surgía del espacio encima del mercurio en el barómetro de Torricelli al agitarlo; realizó un nuevo dispositivo con el que logró observar la repulsión electrostática, aunque fue interpretada como lo hizo Gilbert, como un efecto secundario de la atracción.

Una vez que Hauksbee y Newton mueren, la electricidad se queda sin respaldo debido a que Sociedad Real de Londres pierde interés en ella; hasta 1729, cuando Stephen Gray (1666 – 1736) retoma los experimentos de sus antecesores. Su trabajo más importante, fue encontrar que otro tipo de materia tal y como las plumas de las aves también generaban electricidad al frotarlas. Esto lo descubrió colocando una pluma en el interior de un tubo de cristal, el cual tapó en los extremos. Al frotarlo, Gray descubrió con asombro que la pluma no se acercaba al cristal sino a los tapones, por lo que concluyó que debía haber una virtud comunicada del tubo hacia los tapones.

Después de que Gray descubrió que existían otros materiales con propiedades eléctricas, ya no fue posible creer que la efluvia eléctrica era inseparable de la materia de la cual se "liberaba" por frotamiento. Por lo cual, Gray realizó experimentos para transferir la efluvia de un cuerpo a otro. A partir de ellos pudo diferenciar entre materiales en los que la efluvia corriera fácilmente como el metal, los hilos y en los que no, como la piel, el aire, etc. Por lo tanto, la efluvia fue reconocida como "un **fluido eléctrico** y una de las sustancias de las que el mundo está constituido".⁹

⁹ Whittaker, E. A History of the theories of aether and Electricity, p. 42.

Charles François de Cisternay Dufay (1698 – 1739) reformuló la clasificación de materiales conductores y aislantes debido a que le parecía insuficiente aquella realizada por Gray; calificó como conductores a todos aquellos materiales que pudieran ser electrificados por frotamiento. La aplicación inmediata de esta clasificación era una descripción de cómo electrizar el agua, así como el papel de ésta en la conducción.

Su segundo trabajo fue confirmar la repulsión eléctrica. Para ello utilizó un tubo de vidrio, en el que introdujo dos hojas de oro para cargarlas separadamente. Una vez que estuvieron cargadas observó que ambas se repelían. Dufay estableció la hipótesis de la existencia de dos electricidades, la primera electricidad era la de los sólidos transparentes, como el vidrio, cristal, etc., y la segunda correspondía a la de los cuerpos resinosos, como la cera y el ámbar. De esta forma, cada cuerpo repele otros que han sido cargados con electricidad de la misma naturaleza y atrae a otros cuya electricidad es de naturaleza contraria. Dada la distinción entre ambos tipos de electricidades, a la de los cuerpos transparentes, Dufay llamó **electricidad vítrea** y **resinosa** a la poseída por ceras y resinas.

Otro de los representantes de este período es Jean Antoine Nollet (1700 – 1770), el cual atribuyó el fenómeno eléctrico al movimiento en direcciones opuestas de dos corrientes de un fluido muy sutil y flamable, el cual él supuso se encontraba en todos los cuerpos y en todas las circunstancias. La explicación que Nollet daba a la atracción y repulsión consistía en lo siguiente:

“Cuando un eléctrico es excitado por fricción, parte de este fluido se escapa de sus poros, formando un vapor efluente; y esta pérdida es reparada por un vapor afluente del mismo fluido que entra al cuerpo desde afuera. Cuerpos ligeros en la vecindad del cuerpo, son atrapados en cualquiera de estos dos vapores, siendo atraídos o repelidos por el eléctrico excitado.”¹⁰

Las ideas de Nollet, dieron paso al trabajo de William Watson (1715 – 1787), quien tomó parte en las investigaciones eléctricas durante la tercera etapa.

En esta etapa, el fluido eléctrico fue comparado por algunos con el principio que regía el fenómeno del calor; esto es, tanto el calor como el fluido eléctrico podían ser inducidos por fricción, podían ser transferidos de un cuerpo a otro por contacto y hasta los mejores conductores del calor parecían ser los mejores conductores de la electricidad.

¹⁰ Whittaker, E. A History of the theories of aether and Electricity, p. 44.

Por otro lado, junto con las investigaciones en electrostática se llevó a cabo un debate sobre la acción a distancia, el cual se había iniciado con el trabajo de Newton. El más importante representante era Gottfried Wilhelm Leibniz (1646 – 1716). Él criticó el experimento de Hauksbee, ya que afirmaba que el espacio encima del mercurio en el barómetro no era vacío; podía estar vacío de toda materia visible, pero en cambio, estaba lleno de materia que no podía ser detectada con el ojo humano, además de rayos de luz, de la misma efluvia y algunos otros fluidos que podían pasar a través del vidrio.

También negaba la posibilidad de que fuera posible la acción a distancia:

“Si decimos que la atracción sólo puede ocurrir de una forma explicable, es decir, por el impulso de materia ligera, no podemos admitir que la atracción es una cualidad esencial de la materia”.¹¹

De esta forma, la única opción que quedaba era que dos objetos interactuaran entre sí por contacto y de acuerdo con las leyes de la mecánica; además de que los espíritus no podían actuar sobre la materia porque no habría conservación de lo que el llamaba vis viva, lo cual era la energía cinética de un cuerpo.

Samuel Clarke (1675 – 1716) también rechazaba la acción a distancia. Para él era una contradicción, ya que algo no podía actuar en un lugar donde no había nada, y supondría una acción invisible e intangible. Sin embargo, él a diferencia de Leibniz, sostenía que los espíritus sí podían actuar sobre la materia; en especial, si Dios era un espíritu, y estaba presente en todos lados, podía actuar directamente sobre la materia. Hay que mencionar que Leibniz, no negaba la existencia de Dios, ni su actuación sobre el mundo; pero para Leibniz, Dios actuaba constantemente en su creación y no esporádicamente como sostenía Clarke.

De acuerdo con David Hume (1711 – 1776), esta acción a distancia no era fácil entenderla debido a que “...los objetos distantes... después de ser examinados se encuentra siempre que están ligados por una cadena de causas, las cuales son contiguas entre ellas, y a los objetos distantes; y cuando en cualquier situación no se puede encontrar esta conexión, suponemos que existe”.¹²

Por lo tanto, los seres humanos siempre debían percibir contigüidad en tiempo y lugar entre dos eventos para establecer una relación causal.

¹¹ Carta a Bourguet (1715), Die Philosophischen Schriften, III, p. 580. Citado en Hesse, M., Forces and Fields p. 160.

¹² Treatise, Libro I, Parte III, Sección II. Citado en Hesse, M., Forces and Fields, p. 169.

2.3. La jarra de Leyden

Durante el tercer período (1740 – 1760), la información sobre electricidad creció rápidamente, hasta que empezó a tener su propio espacio en los libros de texto.

Fue en esta época cuando se inventó la jarra de Leyden. Esta jarra era de vidrio, envuelta con un material conductor y en principio estaba llena de agua, aunque después se llenó con alcohol. Primero la llenaban de efluvia¹³ y después sacaban chispas de ella. Para obtener más chispas conectaban jarras en paralelo en lo que llamaron baterías.

Watson propuso que las acciones eléctricas se debían a la presencia de un **éter eléctrico**, el cual en el caso de la carga y descarga de una jarra de Leyden era transferido de un lugar a otro, pero no creado ni destruido. La excitación de un eléctrico consistía no en la “liberación” de algo en su interior¹⁴, sino de una acumulación de éter alrededor del eléctrico a expensas de otro cuerpo, cuya reserva ha sido disminuida. De acuerdo con esto, todos los cuerpos tenían una cierta reserva, la cual se podía transferir de un cuerpo a otro.

Watson había supuesto “que la electricidad es un efecto de un fluido sutil y elástico, que ocupa todos los cuerpos en el globo terráqueo; y que en todos lados, en su estado natural, tiene el mismo grado de densidad; y que el vidrio y otros cuerpos, los cuales denominados eléctricos per se, tiene el poder, por ciertas operaciones conocidas, de adquirir este fluido de otro cuerpo, y transmitirlo a otro, en una cantidad suficiente para ser obvia a nuestros sentidos; y que, bajo ciertas circunstancias, es posible extraer la electricidad de algunos cuerpos.... y comunicarla a otros cuerpos, darles una cantidad adicional, y hacer su electricidad más densa.”¹⁵

De esta forma, Watson deja expuesta su postura sobre la electricidad, a la cual le da un carácter fluido, cuyo poder de atracción y repulsión depende de su densidad. A pesar de que cambia un poco la idea de la liberación de la efluvia, la electricidad no pierde su

¹³ “la electricidad, excitada por las manos de su asistente, brincaba hacia la barra metálica sujeta por cuerdas aislantes, en donde estaba disponible para experimentar” (Heilbron, J. Elements of early modern physics, p. 177.) De la barra, era conducida hacia el interior de la jarra de Leyden. Era así como la llenaban de efluvia.

¹⁴ Hay que recordar, que en las teorías anteriores se proponía la liberación de la efluvia al frotar los cuerpos.

¹⁵ Whittaker, E., A history of the theories of aether and electricity, p. 46.

carácter de fluido.

Benjamin Franklin (1706 – 1790) desarrolló algunos experimentos con los cuales confirmó la existencia de estados eléctricos contrarios. Franklin empleaba los términos de electricidad positiva y negativa, los cuales aun son utilizados. Tenía la visión de la corriente como un fluido constituido de partículas extremadamente sutiles, ya que podía permear la materia común, hasta metales densos, con tal facilidad y libertad como para no recibir ninguna resistencia perceptible.

Los objetos podían tener un exceso o un déficit de dicho fluido. El déficit del fluido representaría un estado negativo, y el exceso un estado positivo. De acuerdo con esta teoría, la repulsión entre dos cuerpos cargados positivamente se debía a que ambos tenían un exceso de fluido que era mutuamente repulsivo.

A pesar de que su teoría sobre la atracción y repulsión de los cuerpos se basaba en el exceso o déficit del fluido eléctrico, Franklin no abandonó la creencia de la efluvia. El observó que la efluvia eléctrica no parecía ser afectada por el aire, ya que de acuerdo con él, la gente podía respirar sin problemas cerca de un cuerpo electrificado.

Al igual que los descubrimientos sobre la atracción, repulsión y corriente eléctrica avanzaban, la teoría sobre la acción a distancia también lo hacía. En 1758, Roger Joseph Boscovich (1711 – 1787) unió la teoría de Leibniz con la física Newtoniana dando como resultado su *Theoria Philosophia Naturalis*. En ella, establecía que la materia consistía de puntos idénticos, de tal forma que no tenía propiedades comunes salvo por la inercia y la capacidad de ejercer fuerza en otros objetos. Con ayuda de la teoría de la continuidad de la materia de Leibniz, argumenta que hasta en las colisiones hay involucradas fuerzas a distancia.

Cabe mencionar que la teoría de acción a distancia que había desarrollado Leibniz, estaba ligada a la teoría sobre la composición de la materia.

Boscovich establece que los elementos que forman la materia son sólo puntos y que la fuerza ejercida entre dos partículas puntuales es una función continua de la distancia entre ellas, y que tiende a infinito cuando están muy cerca, y se vuelve atractiva o repulsiva conforme aumenta la distancia entre ellas.

Utilizando esta función de fuerza continua, trata de explicar la atracción gravitatoria y las fuerzas repulsivas y atractivas de la electricidad.

Durante este período también se ubica el trabajo de Franz Ulrich Theodor Aepinus (1724 – 1802) sobre el **magnetismo**. Este se vio influenciado por las teorías sobre los fluidos eléctricos por lo que supuso que los polos de los imanes eran lugares en los que se encontraba presente un fluido magnético en una cantidad mayor a la normal. Los imanes permanentes eran aquellos en los que dicho fluido estaba atrapado, de tal forma que era difícil moverlo de ahí.

Aepinus asumió que las partículas del fluido se repelían entre sí, y atraían a las partículas del acero y el hierro; y para que la teoría no tuviera ninguna contradicción, se necesitaba que hubiera una repulsión entre las partículas del imán.

Los fluidos magnéticos tenían propiedades de atracción y repulsión mutua, similares a los de la electricidad vítrea y resinosa.

2.4. Los experimentos de Galvani

El **cuarto período** (1760 – 1790) se caracterizó por el desarrollo de teorías, instrumentalización y mediciones cuantitativas.

El trabajo más relevante durante este período fue el de Luigi Galvani (1737 – 1789). Los experimentos más importantes de Galvani fueron los que realizó sobre la electricidad en animales. En 1780, empezó una serie de investigaciones sobre la respuesta a la electricidad en ranas preparadas¹⁶. Sus estudiantes encontraron que las patas de las ranas se contraían al sacar chispas de la máquina eléctrica y tocar simultáneamente los nervios crurales con un bisturí. Galvani llegó a la conclusión de que solamente sucedía si durante la descarga de la máquina, las extremidades de un nervio y de un músculo estaban unidas por un metal conductor. Para obtener convulsiones más violentas, suspendió las patas de ranas de la antena del pararrayos de Franklin. De esta manera, logró darse cuenta que lo que hacía la conducción era un circuito completo, el cual estaba formado por dos metales unidos por el nervio y el músculo de la rana. Lo que había

¹⁶ Las ranas preparadas de Galvani, consistían en la disección en una pieza de la médula espinal, los nervios crurales y los miembros inferiores; para observar la conducción de la electricidad a través de estas partes de la rana.

descubierto Galvani era la producción de la corriente eléctrica por medio del contacto entre dos metales diferentes unidos por un medio húmedo. A pesar de que había logrado la generación de corriente eléctrica, Galvani no lo interpretó como tal, antes bien, afirmó que los animales poseían en sus músculos un fluido similar a la electricidad.

Con estas investigaciones, Galvani deja al descubierto su concepto de la corriente eléctrica, que es similar a la que Franklin poseía: un fluido que poseen los cuerpos.

Con Galvani terminan los cuatro períodos propuestos por Heilbron y que dieron origen a la corriente eléctrica, surgiendo el estudio de la generación y propiedades de la corriente eléctrica. Hay que mencionar que durante este tiempo que abarca el siglo XVII y la mayor parte del XVIII, el elemento principal considerado tanto para las interacciones eléctricas, eso es, atracciones y repulsiones entre objetos cargados eléctricamente, como para la corriente eléctrica fue un fluido eléctrico.

Al finalizar este período y antes de que Faraday introdujera el concepto de éter como mecanismo para la transmisión de las fuerzas eléctricas y magnéticas, los científicos ya habían aceptado la existencia de fuerzas atractivas y repulsivas, debido a la incapacidad de demostrar que los efectos del magnetismo y la electricidad, se dieran por contacto. De igual forma, filósofos como *Immanuel Kant* (1724 – 1804) también apoyaban la acción a distancia de las fuerzas, y lo hacía explícito en su *Metaphysische Anfangsgrunde der Naturwissenschaft* (Elementos metafísicos de las Ciencias Naturales). Para él, las condiciones en las que el ser humano percibía los fenómenos implicaban que los fenómenos cambiaban continuamente, pero no había ninguna forma de evitar que las explicaciones teóricas introdujeran la discontinuidad; es decir, para él no había ningún problema en que las teorías manejaran discontinuidades, aunque la realidad fuera continua.

A pesar de su aceptación de la acción de las fuerzas a distancia, hizo una distinción entre la forma en que actuaban las fuerzas atractivas y como lo hacían las fuerzas repulsivas.

Las fuerzas repulsivas actuaban en donde estaba, esto es, en el lugar en el que se encontraba la materia y no a distancia; actuaban sobre objetos lejanos por medio de la materia que se encontraba entre ellos. Mientras que, las fuerzas atractivas actuaban sin necesidad de un medio; es decir, actuaban a distancia inmediatamente como si hubiera

un vacío. Eran fuerzas que actuaban directamente sobre el interior de los cuerpos. Estas dos fuerzas eran características universales de la materia, según Kant.

2.5. Modelos de corriente utilizados en los siglos XVII y XVIII

Durante los siglos XVII y XVIII, los experimentos realizados tuvieron como principal objetivo encontrar las causas y características del fenómeno eléctrico de atracción.

Dichos experimentos llevaron a los físicos a una explicación basada en una sustancia poseída por los cuerpos, a la cual llamaron efluvia, la cual correspondía a un fluido, una brisa emanada por los cuerpos.

De acuerdo con Heilbron, durante esta etapa, los científicos atribuían a los fenómenos naturales una causa oculta, y en este caso, la naturaleza de la sustancia por medio de la cual se propagaba la acción eléctrica, era una causa oculta.

El estudio sobre la atracción y repulsión de los cuerpos llevó consigo a la formación de los modelos utilizados para su explicación. Por un lado, la electricidad fue vista como un fluido que podía ser liberado de los objetos si se les excitaba. Esto la convertía en una propiedad de los objetos. Por el otro, al conectar dos objetos por medio de un hilo como lo hizo Gray, el fluido podía ser transportado de un lugar a otro.

Cabe resaltar que estos modelos surgieron de la experimentación. Esto es de importancia debido a que "casi siempre se remarca que la física es una ciencia empírica. Muchas veces con esto se quiere decir que las teorías físicas deben ser verificadas por medio de experimentos, y teorías o modelos, las cuales si no concuerdan con los hechos empíricos observados deben ser rechazadas."¹⁷ Por otro lado, como veremos más adelante, no todos los elementos que ayudaron a la formación del concepto de corriente

¹⁷ Hestenes, D. 1992; Duhem, P. 1991; citado en: Kallunki, V., From electrostatics to the circuits of the pile: Experimentality and models in concept formation, p. 15.

y campo surgieron de la experimentación.

Ahora bien, a pesar de que las características del fenómeno eléctrico cambiaron, por ejemplo, algunos reconocían la existencia de la repulsión y otros pensaban que era una causa de la atracción, a lo largo de los dos siglos, los modelos descritos no sufrieron alteraciones esenciales.

La importancia de los dos modelos radica en la base que sentaron para la explicación de fenómenos que mencionaré posteriormente como el de inducción electromagnética o el de corriente eléctrica.

Aunque la idea de acción a distancia en los fenómenos eléctricos y magnéticos se empezó a gestar durante estos siglos, no tuvo mucha aceptación por parte de los científicos, antes bien, predominó la idea de la transmisión de la atracción o repulsión por medio de partículas de un fluido. Un ejemplo de esto fue la consideración que Watson hizo sobre el éter como el medio que propagaba las acciones eléctricas. Este modelo tendrá lugar en la física desarrollada en el siglo XIX.

3. De la pila de Volta a la teoría de Lorentz

En este capítulo se describirá el desarrollo de los conceptos de corriente eléctrica y campo eléctrico. En el capítulo anterior se mostró como el concepto de corriente eléctrica se había empezado a formar, aunque no es, sino hasta los experimentos de Galvani y el descubrimiento de la pila que toma un rumbo más definido. Por lo que se refiere al concepto de campo, es con Faraday con quien inicia, continuando con el trabajo de Maxwell y sus seguidores.

Es importante mencionar que durante finales del siglo XVIII y los primeros años del siglo XIX, algunos científicos se dedicaron al estudio del nuevo fenómeno: la corriente eléctrica. Pero pronto fue dejada de lado y utilizada solamente como herramienta para el desarrollo de las teorías de campo.

Sin embargo, las propiedades de la corriente eléctrica fueron estudiadas principalmente por Ohm, siendo el principal objetivo de estas investigaciones el comportamiento de los circuitos eléctricos.

Es durante esta etapa que, además del descubrimiento de algunas de las propiedades de la corriente eléctrica y de los campos magnético y eléctrico, surge el concepto de campo. Es Leonhard Euler (1707-1783) el encargado de crear una teoría de campo, entendiendo como campo: "una región del espacio en el que cada punto está caracterizado por una cantidad o cantidades que son funciones de las coordenadas espaciales y del tiempo, la naturaleza de estas cantidades depende de la teoría física de la que se trate".¹⁸

Durante el siglo XIX, se intenta encontrar una explicación a la electricidad y al magnetismo por medio de las teorías de campo, a la vez que se establece la descripción matemática tanto de la corriente eléctrica como de los campos magnético y eléctrico.

Es importante hacer énfasis en que la teoría de las interacciones eléctricas había tenido como elemento principal un fluido eléctrico o efluvia, el cual será cambiado por el éter. Sin embargo, esto es sólo en cuanto a las interacciones eléctricas se refiere, ya que en cuanto a la corriente eléctrica, la idea de fluido persistirá.

¹⁸ Hesse, M., Forces and Fields, p. 192.

3.1. Los principios de la corriente eléctrica.

Como se mencionó en el apartado anterior, las primeras investigaciones que se hicieron de la corriente eléctrica como tal, estuvieron a cargo de Luigi Galvani (1737 – 1789). Esto es, experimentos en los que la atención principal la tenía la corriente eléctrica, principalmente su generación y características.

Una vez que Galvani hubo publicado sus experimentos, Alessandro Volta (1745 – 1827) los reprodujo encontrando que las ranas eran magníficos electroscopios. Él estudió el efecto que los distintos metales tenían en la conducción eléctrica, encontrando que metales como el estaño y el cobre eran buenos conductores, mientras que el hierro y la plata no conducían tan bien como los otros. El músculo de la rana dentro del circuito, fue cambiado por distintos materiales como papel, cuero y trapos mojados, siendo que los trapos mojados realzan el fenómeno. Él decía que:

“los metales utilizados en los experimentos, al ser aplicados a los cuerpos húmedos de los animales, pueden por sí mismos, y por su propia virtud, excitar y sacar de su estado de reposo al fluido eléctrico...”¹⁹

Fue de esta forma como Volta creó la pila eléctrica. En este nuevo descubrimiento de Volta, no se ve alterada la idea del fluido eléctrico como elemento esencial en la conducción eléctrica (corriente eléctrica); dicho fluido era impulsado por los conductores húmedos o de segunda clase, de acuerdo con la clasificación asignada a estos por Volta.

A pesar de que Volta había inventado la pila, no sabía de donde provenía la fuerza electromotriz, aunque suponía que era del contacto de los metales. Pero lo que sí sabía, era que la fuerza, ya fuera producida por una atracción, o cualquier otra fuerza, era diferente para cada metal.

Además de la eficiencia de los trapos húmedos en su nuevo aparato, Volta experimentó con líquidos y mezclas de estos. De estos estudios resultan dos modelos. El primero de ellos era una columna de discos metálicos de cobre, plata y zinc en igual número, separados por capas de cuero o cartón mojadas con una sustancia alcalina. El otro

¹⁹ Whittaker, E., A history of the theories of aether and Electricity, p. 69.

modelo corresponde a una serie de vasos llenos de ácido diluido, placas de zinc y de plata ligadas de un vaso al otro por grapas metálicas.

Para Volta, la naturaleza de la corriente generada por la pila era igual a la de la electrostática. Esto fue demostrado al ver que la chispa de una máquina de electricidad estática descomponía el agua al igual que lo hacía una pila.

Johann Ritter (1777 – 1810) fue el encargado de confirmar dicho experimento. Él observó la formación de oxígeno e hidrógeno liberados por la corriente. En 1802 este efecto queda totalmente demostrado por Humphry Davy (1778 – 1829).

Berzelius, junto con Ritter y Davy, desarrollaron parte de la teoría química de la época. Sin embargo, no es ésta a la que nos enfocaremos, sino a su visión de la teoría eléctrica. Berzelius publicó algunas especulaciones con respecto a la naturaleza del calor y la electricidad.

“La mayor pregunta, decía él, es saber si las electricidades y el calórico son materia o fenómenos... Él se inclinaba hacia a la opinión de que el calórico era materia.... De la relación que existe entre el calórico y las electricidades, decía, es claro que lo que es verdadero con respecto a la materialidad de una debe también ser verdad con respecto a la otra. De cualquier manera, existen una cantidad de fenómenos producidos por la electricidad que no admiten una explicación sin admitir al mismo tiempo que la electricidad es materia. La electricidad, ... pasa a través de los conductores sin dejar alguna huella de su paso, pero penetra no-conductores que se oponen a su curso, y hace una perforación de la misma forma que hubiera hecho algo que necesitara lugar para pasar.”²⁰

Estas declaraciones de Berzelius, expresan de forma explícita el hecho de que a la corriente eléctrica se le considerara algo material, de la misma manera que se hizo con el calor.

Esta etapa, en la que el objeto de estudio era principalmente la generación de la corriente eléctrica, aunque sin dejar de lado las suposiciones que se hicieron sobre su naturaleza, dura muy poco, puesto que, inmediatamente los efectos de la corriente toman mayor importancia que la generación y naturaleza de ella. De cualquier manera, tanto Faraday como aquellos científicos que se dedicaron al estudio de la teoría de campo, conceden un tiempo para el estudio de la corriente eléctrica.

²⁰ Whittaker, E., A history of the theories of aether and Electricity, p. 80.

3.2. Magnetismo: un efecto de la corriente eléctrica

Es en esta etapa, donde la corriente se empieza a utilizar como una herramienta, y lo que acaparará de ahora en adelante la atención de los científicos serán principalmente los efectos de la corriente en distintos materiales, en especial, los efectos magnéticos de la corriente.

Hans Christian Oersted (1777 – 1851) es el encargado de comenzar esta nueva etapa de descubrimientos. Esta la inició al tratar de explicarse los cambios que observaba en una aguja de una brújula durante una tormenta. Este cuestionamiento ya llevaba muchos años entre los científicos. Todos estos fenómenos, además del trabajo de Ritter atrajeron a Oersted a la experimentación, la cual consideró sumamente importante durante su vida científica. En una versión de *Recherches sur l'indépendance des forces chimiques et électriques*, publicada en París en 1813, Oersted expresa su visión sobre el Magnetismo entre otras cosas:

“... el Magnetismo existe en todos los cuerpos de la naturaleza... Por esta razón se siente que las fuerzas magnéticas son tan generales como las fuerzas eléctricas. Uno debería probar si la electricidad en su forma más latente tiene alguna acción sobre un imán. Este experimento podría ofrecer algunas dificultades porque los efectos eléctricos están siempre involucrados, haciendo que las observaciones sean complicadas.”²¹

De aquí que la visión de Oersted sobre estos fenómenos, era que ambos estaban ligados, ya que al experimentar con el magnetismo, siempre aparecía la electricidad. Hay que resaltar que tanto Ritter como Oersted creían en una unidad de fuerzas de la electricidad y el magnetismo. Fue en 1820 cuando en una experiencia realizada ante sus alumnos, Oersted demostró la desviación de la aguja al pasar una corriente paralela cercana a ella. Después de este descubrimiento, Oersted escribió :

“ Cuando empecé a estudiar la naturaleza de la electricidad, concebí la idea de que la propagación de la electricidad consistía en un disturbio incesante y una restauración del equilibrio y estos incluían una actividad abundante que no podía predecirse que fuera una corriente uniforme. Entonces, concebí la transmisión de electricidad como un conflicto eléctrico y me encontré a mí mismo, particularmente en mis investigaciones sobre el calor producido por la descarga eléctrica, inducido a mostrar que dos fuerzas eléctricas opuestas en el conductor calentado por su acción, son combinadas para escapar toda observación, Puedo también recordar que, de manera inconsistente, esperaba el efecto predicho particularmente de la descarga de una gran batería eléctrica y más aún solo esperaba un campo magnético débil..... Puse atención a las variaciones

²¹ Stauffer, R., *Speculation and Experiment in the Background of Oersted's Discovery of Electromagnetism*, p 39

de la aguja magnética durante una tormenta....."²²

En las líneas anteriores, es resaltada por un lado la concepción que Oersted tenía de la corriente eléctrica y el efecto que tenía lugar en el espacio circundante al cable que transportaba dicha corriente, la cual correspondía a un conflicto eléctrico. En segundo lugar, la visión que integraba tanto los fenómenos eléctricos como los magnéticos.

De acuerdo con Oersted, el conflicto eléctrico sólo actuaba sobre las partículas magnéticas de la materia. Todos los cuerpos no magnéticos parecían mostrarse penetrables por el conflicto eléctrico, pero las partículas de los cuerpos magnéticos resistían el paso del conflicto; de esta forma podían ser movidos por el ímpetu causado por la resistencia al paso del conflicto eléctrico. En el artículo *Oersted's Account of the Discovery of Electromagnetism*, publicado en la Enciclopedia de Edimburgo, la concepción de Oersted de corriente eléctrica queda plasmada en el siguiente párrafo:

"... él no consideraba la transmisión de electricidad a través de un conductor como un flujo uniforme, pero sí como una sucesión de interrupciones y restablecimientos de equilibrio, de tal manera que los poderes eléctricos en la corriente no estaban en equilibrio, sino en un estado de continuo conflicto. Así como los efectos luminosos y caloríficos de la corriente eléctrica, salen en todas direcciones del conductor, el cual transmite una cantidad grande de electricidad; entonces, pensó, es posible que el efecto magnético sea irradiado de la misma forma..."²³

En estas otras líneas, no sólo queda explícita la concepción que Oersted tenía sobre la corriente eléctrica, sino también la forma en la que los efectos magnéticos eran propagados a través del cable conductor.

De las notas en las cuales Oersted describe la metodología de sus descubrimientos, se observa que sabía que el conductor no necesitaba estar incandescente para que la aguja fuera deflectada. También observó que un circuito eléctrico cerrado actuaba como un imán. Al tiempo en el que el segundo artículo de Oersted era recibido en París en Septiembre de 1820, André Ampère (1775 – 1836) anunciaba su descubrimiento de las fuerzas mutuas entre dos corrientes eléctricas paralelas.

De esta forma, muchos científicos se incorporaron a esta serie de descubrimientos, anunciando una nueva etapa en el estudio de la electricidad.

²² Stauffer, R., *Speculation and Experiment in the Background of Oersted's Discovery of Electromagnetism*, p.45

²³ *Ibidem*, p.49

3.3. La teoría de Ampère

El primero de los científicos que se incorporaron a esta nueva etapa en la que se desarrolló la teoría electromagnética así como la electrodinámica fue Ampère.

Ampère era un seguidor de la escuela que explicaba todos los fenómenos físicos en términos de fuerzas iguales y opuestas entre pares de partículas.

Lo primero que él estableció, fue que la dirección de la corriente en el experimento de Oersted determinaba la dirección en la que la aguja se desviaba.

Por otro lado, Ampère convencido de que las corrientes eléctricas se rechazaban al igual que lo hacían las cargas eléctricas, demuestra que las corrientes paralelas del mismo sentido se atraen, mientras que las de sentido opuesto se repelen. En su tratado de electricidad y magnetismo, Maxwell declara que esta ley de acción entre circuitos, no fue desarrollada por Ampère mediante experimentación, antes bien, mediante un proceso del cual no se puede dar cuenta.

Al principio Ampère sugirió que las fuerzas entre circuitos que transportan corrientes eléctricas se puede deber a "la reacción del fluido elástico que se extiende por todo el espacio, cuyas vibraciones producen el fenómeno de la luz, y el cual es puesto en movimiento por las corrientes eléctricas. Este fluido o éter, dice Ampère, no es otra cosa sino el resultado de la combinación de las dos electricidades."²⁴

Otra de las concepciones que sostenía Ampère sobre dicho fenómeno, era que los espacios entre las moléculas metálicas de un cable que transporta corriente eléctrica debían estar ocupados por un fluido compuesto de dos electricidades, no en las proporciones que formaban el fluido neutral, sino con un exceso de alguna que fuera opuesta a la electricidad natural de las moléculas del metal. En el fluido intermolecular, decía Ampère,

"las electricidades opuestas están continuamente siendo disociadas y recombinadas; una disociación del fluido dentro de un intervalo intermolecular que haya tenido lugar, la electricidad positiva producida se une a la electricidad negativa del siguiente intervalo en la dirección de la

²⁴ Whittaker, E., A history of the theories of aether and Electricity, p. 84.

corriente, mientras que la electricidad negativa del primer intervalo se une con la electricidad positiva del siguiente intervalo en dirección contraria. Estos cambios constituyen la **corriente eléctrica**.”²⁵

Debido a que la parte central de las investigaciones de Ampère no era la naturaleza de la corriente, sus memorias no están enfocadas a dicho tema, antes bien, el tema que ocupa la mayor parte de ellas es el experimento de las fuerzas entre corrientes eléctricas.

De acuerdo con Ampère un imán podría ser reemplazado por una corriente. Este hecho lo comprobó utilizando un solenoide por el que hace pasar una corriente, y comprueba que éste se comporta como un imán. Esto lo lleva a la hipótesis de que el “**magnetismo** de los materiales es el resultado de minúsculas corrientes que circulan en torno a las moléculas”.²⁶ Por tanto, dentro de la materia existían circuitos eléctricos moleculares.

Esta comparación establecida entre la corriente eléctrica y el imán atendía a la presencia de las mismas propiedades simétricas que Ampère observaba en ambos.

Sin embargo, dentro de la teoría anterior debía comprobarse que las interacciones simétricas entre corrientes eran también propiedades de la interacción entre imanes.

De esta forma, antes de la imanación existían en los diferentes materiales minúsculas corrientes que circulaban en torno a las moléculas (no de una molécula a otra) orientadas al azar en todas direcciones; de manera que si se imanaban estos metales todas las corrientes se orientaban en la misma dirección. Gracias a esta hipótesis se deja de lado la esfera de virtud que pusiera de moda Gilbert.

Tal parece que Ampère estaba inclinado a considerar las fuerzas magnéticas como una modificación de las fuerzas eléctricas debido al movimiento de las cargas eléctricas.

En el momento en el que Ampère realizó sus descubrimientos de la acción mutua que se ejercían entre sí dos circuitos, la mejor hipótesis sobre el comportamiento de la corriente eléctrica, estaba a cargo de Gustav Theodor Fechner (1806 – 1887) :

“una corriente siempre fluía a través de los conductores en pares: una corriente de electricidad positiva en una dirección, y una corriente igual de electricidad negativa con la misma velocidad en dirección opuesta.”²⁷

También suponía que cargas iguales se atraían entre ellas mientras se movían paralelas

²⁵ Whittaker, E., A history of the theories of aether and Electricity, p. 84.

²⁶ Papp, D., Historia de la Física, p. 187.

²⁷ Hesse, M., Forces and Fields, p. 217.

en la misma dirección, mientras que cargas distintas se atraían cuando se movían en direcciones opuestas.

A la par del desarrollo de la electrodinámica, se lograba encontrar otras propiedades de la corriente. Algunas de las propiedades fueron encontradas por Thomas Seebeck (1770-1831) y Jean Charles Athanase Peltier (1785 – 1845). Seebeck descubrió que en un circuito formado por dos metales diferentes se generaba una corriente eléctrica cuando los dos metales se encontraban a diferentes temperaturas; y Peltier descubrió que cuando la corriente pasa a través de un circuito formado por dos metales, se produce un cambio de temperatura –absorción o generación de calor-.

Fue en este siglo (XIX), que la teoría de la corriente eléctrica avanzó considerablemente, sin embargo, la atención de las investigaciones, se centraba en el cable conductor y no en el fenómeno de conducción. Así, mientras el estudio de los efectos producidos por el cable conductor presentaba gran avance, el estudio sobre la naturaleza de la corriente se quedaba casi igual a como se había dejado en el siglo XVIII, por lo que la mayoría de los científicos proponían a la corriente eléctrica como uno o dos fluidos.

3.4. Faraday

Con los descubrimientos de Oersted y Ampère, Michael Faraday (1791 – 1867) empezó a interesarse en los fenómenos electromagnéticos; repitió los experimentos hasta entonces reportados para entender las características de este nuevo fenómeno.

Con el fin de comprender mejor el desarrollo realizado por Faraday sobre el concepto de campo y corriente eléctrica, es necesario tener en cuenta el hecho de que él era un gran experimentador y que realizaba muchas especulaciones de forma que pudiera explicar los fenómenos que observaba.

De acuerdo con Nersessian, sus experimentos fueron parte crucial en su búsqueda de la

naturaleza de las acciones eléctricas y magnéticas.²⁸ Por lo tanto, los resultados reportados por Faraday en sus publicaciones son consecuencia tanto de sus experimentos como de su especulación.

3.4.1. Faraday: electricidad y corriente eléctrica

Primero que nada, hay que recordar, que a partir de los experimentos de Galvani, tanto los científicos como los filósofos habían establecido una diferencia entre la electricidad animal y la generada por la pila de Volta. Faraday, se inclinó a pensar que las dos eran iguales, esto es, no había ninguna diferencia en la naturaleza de ambas; aunque de acuerdo con él, faltaban experimentos que lo demostraran de forma contundente. Sin embargo, hacía una diferencia entre lo que llamó **electricidad de tensión** -electricidad en reposo que atrae o repele cosas a ciertas distancias-, y **electricidad en movimiento** – aquella cuyos efectos son calor, magnetismo, descomposición química, fenómenos fisiológicos y chispas-.

La **electricidad de tensión** era ligada directamente con las pilas voltaicas. Los platos que conformaban dichas pilas, tenían la característica de repelerse y atraerse entre ellos; por otro lado, el aire podía descargar los platos de las pilas sin generar ninguna reacción química o alguna corriente eléctrica de manera contraria a como sucedía con la jarra de Leyden , la cual al ser descargada generaba corrientes eléctricas y chispas. Otro hecho que caracterizaba a la electricidad de tensión era la capacidad de los polos de una pila para cargar una jarra de Leyden.

La **electricidad en movimiento** tenía características que la diferenciaba de la electricidad en tensión. En primer lugar, el calor generado por el paso de la corriente por un cable, era un hecho notorio. El descubrimiento de Oersted, de deflectar una aguja magnética colocada cerca del cable por donde circula era otra de sus características.

²⁸ Nersessian, N. Faraday to Einstein: Constructing meaning in scientific theories, p.37.

Después, se había descubierto que la corriente eléctrica era capaz de realizar una descomposición química, como la del agua, descubierta por John Ritter.

Las otras dos características que le atribuye Faraday a la electricidad en movimiento son: su capacidad de hacer convulsionar a un animal cuando una corriente pasa a través de él, y las chispas producidas por la descarga de una batería.

A pesar de las diferencias establecidas, entre electricidad de tensión y electricidad en movimiento, las corrientes eléctricas también se diferenciaban. Esto es, no era lo mismo un cable que llevara electricidad voltaica que uno que llevara electricidad "ordinaria". La **corriente voltaica** era aquella que generaba un **arreglo progresivo** en el cable.

Ahora bien, Faraday designaba como **corriente** a "algo progresivo, ya sea un fluido o electricidad, o dos fluidos moviéndose en direcciones opuestas, o vibraciones, o, hablando de manera más general, fuerzas progresivas. Por arreglo, entiendo un ajuste local de las partículas, o fluidos, o fuerzas, no progresivo."²⁹ De aquí que de acuerdo con Faraday, la corriente correspondiera a un ajuste local ya sea de partículas, fluidos, etc. que se iba desplazando a lo largo del cable.

Por otro lado, para Faraday la **electricidad ordinaria** era aquella "que puede ser obtenida por cualquier máquina común, o de la atmósfera, o por presión... o por una multitud de otras operaciones; su carácter distintivo es el de la gran intensidad, y la ejecución de poderes atractivos y repulsivos, no sólo a distancias sensibles pero también a distancias considerables."³⁰ Sin embargo, el poder de atracción y repulsión presentado por la electricidad ordinaria, también se encontraba presente en la electricidad de tensión o electricidad voltaica.

Así como la electricidad voltaica y la ordinaria tenían en común el poder de atracción y repulsión, también tenían en común el calor que generaba al pasar por un cable u otras sustancias. Con respecto a la capacidad de deflectar una aguja imantada, la electricidad voltaica lo hacía con mayor intensidad que la electricidad ordinaria; la acción química de ambas electricidades también coincidía, al igual que los efectos en la fisiología de los animales (convulsiones). Por último, las chispas generadas por una descarga de electricidad ordinaria eran iguales a las generadas por la descarga de electricidad

²⁹ Faraday, M. *Experimental Researches in Electricity*, v. I, p. 81.

³⁰ *Ibidem*, p. 82.

voltaica; ambas tenían el mismo brillo.

Faraday reconocía que la electricidad atmosférica era de la misma naturaleza que la electricidad ordinaria, así como la existencia de la magneto-electricidad –generada por inducción magneto-eléctrica- y la termo-electricidad –descubierta por Seebeck-. Después de haber establecido todas estas diferencias, y las características de cada una de las electricidades Faraday concluye diciendo: "...electricidad, cualquiera que sea su fuente, es idéntica en su naturaleza."³¹

Con respecto a la posibilidad de que la electricidad fuera un fluido, Faraday decía que sería imposible tener un fluido en una condición libre sin que este produjera por inducción otro fluido.

Otro caso podía ser que una porción aislada de materia sin carga, pudiera por algún cambio de estado, generar cualquiera de las dos electricidades, y esta a su vez generar un estado opuesto en el vecindario por inducción. Hay que recordar que las teorías que se habían desarrollado, sugerían la existencia no sólo de un fluido, sino de dos, siendo estos contrarios, y la teoría de Faraday sobre la presencia de dos fuerzas dentro de la corriente eléctrica no era la excepción; él aseguraba que la corriente debía poseer dos fuerzas y que nunca podría haber solamente una corriente o fuerza o un fluido, siempre dos.

Faraday liga la electricidad con la inducción, al destacar que no puede haber carga en un cuerpo si esta no ha sido generada por un principio similar al de inducción. Esto es, al establecer la imposibilidad de que la electricidad o la carga de los cuerpos fuera un fluido debido a que si fuera así, este generaría otros fluidos por inducción, Faraday afirma que tanto la carga de un cuerpo como las corrientes, pueden existir gracias a procesos como el de inducción: "La inducción parece ser la función esencial en el desarrollo y los fenómenos consecuentes de la electricidad."³²

Lo anterior indica el papel del principio de inducción como el padre de toda acción eléctrica, de tal forma que, precedía todas las corrientes; siendo la **intensidad** de las corrientes el grado en el que las partículas eran afectadas con el estado forzado.

³¹ Faraday, M. Experimental Researches in Electricity, v. I, p. 102.

³² Ibidem, p. 367.

La corriente eléctrica también era consecuencia del principio de inducción, siendo generada por descarga y excitación. Entre los tipos más comunes o utilizados de excitación se encontraban la fricción, acción química, influencia del calor y por supuesto inducción; y entre los tipos de descarga se encontraba la conducción.

Para Faraday, el proceso de conducción se debía a “una acción de partículas contiguas, dependientes de las fuerzas desarrolladas en la excitación eléctrica; esas fuerzas llevan a las partículas a un estado de tensión o polaridad; y ya estando en este estado, las partículas contiguas tienen un poder o capacidad de comunicarse estas fuerzas la una a la otra, ...”³³

A pesar de que Faraday tenía claros los factores que producían la electricidad, además de la relación de la corriente con los experimentos que había realizado, entre ellos el de inducción; la corriente eléctrica no era el objeto principal de sus investigaciones. Aunque trató de dar una explicación de la corriente eléctrica, la mayoría de las veces la veía como una **causa** de una variedad de fenómenos, y un agente con varios poderes, entre los que se encontraban el calor y la acción electrolítica, respectivamente.

3.4.2. Faraday: la propagación de las fuerzas

“El concepto de campo de Faraday fue desarrollado durante tres períodos de investigación: (1) la investigación y el descubrimiento de la inducción electromagnética, (2) la investigación sobre la inducción electrostática y electroquímica, de la cual surgió el descubrimiento de la capacitancia inducida específica del medio dieléctrico; y (3) la investigación sobre la inducción magnética...”³⁴

En 1831, enrollando dos bobinas de hilo sobre un cilindro de madera, y aislándolas pero colocándolas cerca entre sí, hizo pasar una corriente por la primera y conectó un galvanómetro a la segunda. Observó que mientras circulaba una corriente en la primera bobina, la aguja del galvanómetro no presentaba ningún cambio, pero al cerrar o abrir el circuito, la aguja del galvanómetro presentaba una pequeña desviación; la cual se

³³ Whittaker, E., A history of the theories of aether and Electricity, p. 189.

³⁴ Nersessian, N. Faraday to Einstein: Constructing Meaning in Scientific Theories, p. 42.

realizaba hacia cierto lado al momento de conectar y hacia el lado contrario al momento de desconectar. Gracias a ese experimento, Faraday descubrió la *inducción electromagnética*. Con el término inducción también designó a la propiedad de las corrientes eléctricas de inducir algún estado particular en la materia que se encuentra en el espacio que las rodeaba.

Después del descubrimiento de la inducción electromagnética, Faraday se cuestionó acerca de la propagación de las fuerzas electromagnéticas, es decir, la relación con la materia a través de la cual se propagan. Él no estaba de acuerdo en que las fuerzas eléctricas y magnéticas constituyeran una acción a distancia.

Debido a su falta de instrucción, Faraday tenía que experimentar para demostrar la intervención del medio en la propagación de las fuerzas eléctricas y magnéticas. Uno de estos experimentos lo realizó con dos circuitos. Mientras que por el primer circuito pasaba una corriente, el segundo circuito –sujeto a la inducción– parecía “resistirse a la formación de una corriente eléctrica en él...”³⁵. Sugirió que al suceder esto, se generaba un estado de tensión eléctrica en la materia sujeta a la inducción; a este estado lo llamó ***electro-tónico***.

Dicho estado no generaba efectos eléctricos mientras duraba, ni le daba a la materia propiedades especiales, tampoco los hacía reaccionar ante “poderes”³⁶ atractivos o repulsivos; sin embargo la generación del estado electro-tónico producía una corriente en el segundo circuito, de tal forma que cuando ya no había corriente en el primer circuito el estado electro – tónico desaparecía, es decir, desaparecía la fuerza inductiva.

Una de las características que más llamó la atención de Faraday, era el poco tiempo requerido para que la inducción magneto-eléctrica se llevara a cabo, a diferencia de la inducción voltaico-eléctrica, la cual llevaba más tiempo. Esta diferencia se debía a que al “enviar una corriente voltaica a dos cables paralelos,... una corriente es producida en el otro cable, tan pronto, como el tiempo requerido para una acción de este tipo, y por medio de la experimentación se encuentra que es muy corto. La acción parece ser instantánea, porque como hay una acumulación de poder en los polos de la batería antes del contacto,

³⁵ Faraday, M. *Experimental Researches in Electricity*, v. I, p. 16.

³⁶ Así llama Faraday a las fuerzas atractivas y repulsivas en su libro *Experimental Researches in Electricity*.

el primer toque de electricidad en el cable de comunicación, es mayor que el producido después de que el contacto es completado; en el momento, el cable de inducción se encuentra en un estado electro-tónico..."³⁷ Esto es, Faraday establecía que el efecto al conectar la corriente era instantáneo debido al poder almacenado previamente; después dicho efecto se estabilizaba, disminuyendo el estado electro-tónico.

Harman, menciona que para Faraday "el **estado electro-tónico** significaba una polarización de las moléculas de la materia, es decir una disposición de fuerzas por las cuales una molécula adquiría poderes eléctricos opuestos en partes diferentes."³⁸ De esta forma, la descomposición electroquímica correspondía a la acción de fuerzas por las partículas de la materia.

Faraday describe en su *Experimental Researches* que "el **estado electro-tónico** parece ser un estado de tensión, y puede ser considerado como equivalente a una corriente de electricidad, al menos igual a la producida cuando la condición (estado electro-tónico) es inducida o destruida."³⁹ Sin embargo, la corriente generada mediante este estado, no era considerada por Faraday como una medida de la tensión del estado electro-tónico, debido a que los metales, como se había mencionado antes, no cambiaban sus características de conducción debido a que se encontraran en un estado electro-tónico, además de que la corriente generada en el cable inducido, aparecía de inmediato, pero podía desaparecer de la misma forma: de inmediato.

Los resultados experimentales llevaron a Faraday a establecer que el estado electro-tónico estaba relacionado con las partículas, y de ninguna forma con la masa del cable bajo inducción. Por esta razón, el estado también era asumido en los líquidos cuando no había una corriente eléctrica detectable, y también en materiales no conductores; simplemente por la existencia o presencia de un poder conductor y la fuerza momentánea ejercida por las partículas en un cierto arreglo.

Por otro lado, Faraday pensaba que la corriente de electricidad que inducía el estado electro-tónico en un cable cercano, también podría inducir dicho estado en el propio

³⁷ Faraday, M. *Experimental Researches in Electricity*, v. I, p. 19.

³⁸ Harman, P. *Energy, Force and Matter. The conceptual development of nineteenth-century Physics*, p. 75.

³⁹ Faraday, M. *Experimental Researches in Electricity*, v. I, p. 19.

cable, ya que el estado electro-tónico no interfería con la corriente eléctrica generada en el cable; es decir, se podía tener en el mismo cable un estado electro-tónico y una corriente eléctrica. La existencia de la conductividad y un estado electro-tónico de forma simultánea, era comparada con un imán por el que pasaba una corriente eléctrica, y que al mismo tiempo conservaba sus propiedades (atracción).

Finalmente, Faraday reconoció que por todos los materiales por los que pasara una corriente eléctrica debían asumir un estado electro-tónico. Faraday declara en su *Experimental Researches of Electricity* que en el estado electro-tónico:

"las partículas homogéneas de la materia parecen asumir un arreglo regular eléctrico pero forzado, en la dirección de la corriente, el cual,... en la materia que se puede descomponer, este estado forzado puede ser suficiente para hacer que una partícula elemental deje a su compañera, con la que está en una condición de unión, y se asocia a una partícula vecina similar, en relación a la cual es una condición más natural..."⁴⁰

Tanto el estado electro-tónico como la corriente eléctrica, podían ser interrumpidos o adquiridos por el cable en cualquier momento.

Al demostrar que la inducción electromagnética se llevaba a cabo a lo largo de líneas curvas, él aseguró que la inducción electrostática estaba mediada por la transmisión de fuerzas entre las partículas del dieléctrico que rodeaban el cuerpo electrificado.

Uno de los experimentos que Faraday realizó y que lo llevaron a rechazar la acción a distancia, fue la medición de lo que Maxwell llamó constante dieléctrica.

Este experimento le permitió concluir que las fuerzas eléctricas entre dos cuerpos no dependen solamente de la distancia que los separa, sino también del tipo de material que se encuentra entre ellos⁴¹. Además, las fuerzas eléctricas deberían propagarse con la ayuda de las partículas del material y transmitirse punto a punto a través del medio, es decir, el material dieléctrico propagaba las fuerzas por medio de sus propias partículas, cada una de las cuales funcionaba como un conductor y se polarizaba, teniendo carga positiva de un lado y negativa del otro, de manera simétrica. Dicho estado de polarización al que eran sujetas las partículas al momento de la inducción, resultaba ser un estado forzado, el cual permanecía mientras la fuerza estaba presente, y regresaban a

⁴⁰ Faraday, M. *Experimental Researches in Electricity*, v. I, p. 22.

⁴¹ Faraday nombra dieléctrico al material que se encuentra entre los cuerpos en los que actúan las fuerzas eléctricas.

su estado normal al ser removida la fuerza.

Con la acción entre partículas vecinas, Faraday negaba la acción a distancia:

“Me parece posible y probable, que la acción magnética sea propagada a cierta distancia por la acción de partículas que intervienen en el medio, de alguna manera, teniendo una relación con la forma en la que las fuerzas inductivas de la electricidad estática son transferidas a distancia; las partículas que intervienen asumen por el momento una condición peculiar, la cual he expresado muchas veces con el término **estado electro-tónico**.”⁴²

Sin embargo, a pesar de que estaba convencido de esta acción entre partículas contiguas, los términos utilizados para describir esta acción no lo convencían del todo: “la palabra contiguas tal vez no es la mejor que ha podido ser utilizada; ya que las partículas no se tocan entre ellas.... Por partículas contiguas quiero decir las que están próximas”.⁴³

Con estas declaraciones, Faraday negaba lo establecido por Cavendish y Poisson, entre otros, ya que ellos consideraban la inducción como una acción a distancia y en línea recta.

Por otro lado, las afirmaciones de la acción por partículas contiguas parecían incluir un poco de contradicción a la teoría de Faraday, ya que finalmente, las partículas a escala atómica actuaban a distancia. A esta declaración siguió la refutación por parte de Faraday de la acción a distancia a escala atómica. Ya que de acuerdo con él, todas las partículas de los materiales dieléctricos eran conductores, y las propiedades de los aisladores provenían de la suposición de que las partículas no se encontraban en contacto si no serían conductores. De aquí que los átomos de los materiales conductores estuvieran en contacto entre sí.

En una carta publicada en el *Philosophical Magazine* en 1844, Faraday expresó un argumento que negaba que los átomos tanto de los dieléctricos como de los conductores estuvieran separados:

“los átomos tienen un cierto volumen y están provistos de poderes que los mantienen juntos en grupos, pero no se tocan. Entonces sólo el espacio es continuo a través de la materia considerándolo como un agregado de los átomos. Entonces, como hemos visto, en los aisladores, el espacio debe ser un aislador, pero en los conductores, el espacio debe ser un conductor, si sus átomos no se tocan, el espacio debe ser un conductor.”⁴⁴

⁴² Whittaker, E., A history of the theories of aether and Electricity, p. 189.

⁴³ Hesse, M., Forces and Fields, p 199.

⁴⁴ Ibidem, p. 200.

De esta forma, al aceptar la teoría atómica, la cual establecía que los átomos estaban separados unos de otros, se aceptaba que el espacio en los conductores era conductor y en los aislantes el espacio era un aislante. Sin embargo, decía Faraday, cualquier tipo de razonamiento que lleve a semejante conclusión, será falso.

Este era un argumento que Faraday utilizó para expresar la dificultad que tenía en aceptar un espacio que no estuviera lleno de átomos y las contradicciones al suponer esta visión de los átomos separados.

De acuerdo con lo anterior, Faraday desarrolló su teoría considerando la contigüidad de las partículas, las cuales podían comunicarse y transferir las fuerzas polares⁴⁵; siendo que la comunicación rápida constituía la conducción y la comunicación que presentaba dificultades constituía un aislador. De esta forma, tanto las partículas de los conductores como de los aisladores poseían la propiedad natural de comunicar sus fuerzas con facilidad o dificultad, siendo esto último lo que caracterizaría a los dos tipos de materiales.

La **inducción** correspondía a:

"un efecto resultante de la acción de la materia cargada con electricidad libre o excitada sobre materia aislante, tendiendo a producir en ella igual cantidad del estado contrario. Esto sólo se puede lograr mediante la polarización de las partículas contiguas a ella (materia cargada), y estas a su vez a las que se encuentran cerca; y entonces la acción se propaga del cuerpo excitado a la masa conductora próxima, y ahí dan la fuerza contraria evidentemente en consecuencia del efecto de comunicación el cual ocurre en la masa conductora entre las partículas de dicho cuerpo."⁴⁶

Para comprender lo anterior, hay que tomar en cuenta que Faraday consideraba que para que el proceso de electrificación por fricción tuviera éxito, al menos uno de los elementos que se frotan debía ser un aislante. Esto se debía a que "durante el acto de frotamiento, las partículas de tipos opuestos debe ser puestas más o menos juntas,..."⁴⁷; lo cual producía estados opuestos muy marcados en cada uno de los tipos.

A pesar de que Faraday explica lo que sucede al frotar dos materiales distintos y establece la condición de que para que la carga por frotamiento tenga éxito al menos uno de los materiales debe ser un aislante; no explica a fondo las causas de estos acontecimientos; un ejemplo de esto es que sólo menciona que al frotar los dos

⁴⁵ Faraday decía que cuando la electricidad actuaba en la materia, su acción era transversal. La fuerza transversal ejercida tenían un carácter de polaridad. Este carácter podía ser simple atracción o repulsión. La influencia entre las partículas contiguas al momento de la inducción eléctrica correspondía a la aplicación de las fuerzas polares.

⁴⁶ Faraday, M. *Experimental Researches in Electricity*, v. I, p. 534.

⁴⁷ *Ibidem*, p. 555.

elementos, en los tipos opuestos de partículas se crean estados opuestos, sin embargo no expone la causa o el proceso que sigue la creación de dichos estados.

Por lo tanto, la inducción eléctrica quedaba ligada a los efectos de polarización del medio, mientras que los efectos magnéticos no.

Con su teoría, Faraday se acercaba más a que los átomos de los dieléctricos estuvieran juntos, y su teoría de la acción entre partículas contiguas fuera correcta.

En su artículo titulado "*On the physical character of the lines of magnetic force*", estableció algunas de las características que daban la pauta para determinar el tipo de acción que caracterizaba la radiación, gravitación, inducción eléctrica y corriente eléctrica. Con respecto a la inducción eléctrica, era afectada por el medio material como ya se ha mencionado, pero esto no era cierto en el vacío, en donde las líneas serían rectas como las de la gravedad o curvas. La propagación no requería tiempo, era instantánea. La acción magnética, sí era afectada por la materia que intervenía y no era en línea recta. Lo único que le faltaba para demostrar que no era una acción a distancia era que llevaba tiempo, pero nunca pudo demostrar que las acciones magnéticas tomaban tiempo.

De la corriente eléctrica, estableció que al igual que la inducción eléctrica era afectada por el medio en cuanto a su dirección y cantidad, y que estaba relacionada totalmente con un medio material. Se necesitaba tiempo para su propagación hasta en buenos conductores. Las líneas de flujo estaban limitadas, podían ser infinitas o continuas. En ambos casos la corriente, dependía de dos extremidades ya fueran los platos de una pila o dos conductores cargados.

Con estas características hacía explícita la actuación del medio tanto en la inducción eléctrica como en la corriente eléctrica y aunque no resolvía con esto la pregunta sobre la transmisión de fuerzas, la visión que poseía de las fuerzas eléctricas manifestadas en espacios alrededor de las partículas cargadas, sería característica de la teoría eléctrica del siglo XIX.

Hay que resaltar que para Faraday era probable que ambas fuerzas, tanto la eléctrica como la magnética se propagaran de la misma forma, por medio del estado adquirido por las partículas intermedias o estado electro-tónico. Aunque Faraday había demostrado lo contrario: que las fuerzas magnéticas eran independientes de la materia que interviene entre el cuerpo inductor y el que es inducido, excepto en algunos casos, como por

ejemplo en el que el medio que interviene es plata, cobre u oro.

Ahora bien, ya que Faraday hubo establecido la forma en que estas fuerzas se propagaban y actuaban, lo único que le quedaba por establecer, era la naturaleza de estas fuerzas, las cuales decía, no dependían de los fluidos eléctricos sino de las vibraciones u otras afecciones de la materia en la que aparecían. Sin embargo, de acuerdo con él cualquiera que fuera la naturaleza de las fuerzas, no hacía ninguna diferencia en su teoría. En sus escritos, deja de lado la discusión de la naturaleza de las fuerzas, enfocándose más a la forma en la que estas se transmiten.

3.4.3. Faraday: las líneas de fuerza

Faraday introdujo el concepto de líneas de fuerza para describir las acciones eléctricas y magnéticas después del descubrimiento de la inducción electromagnética.

Faraday empleó la idea de líneas de fuerza como una representación geométrica de las líneas de partículas polarizadas sujetas a la tensión eléctrica. Ya que la polarización adquirida por el dieléctrico al ponerlo en un campo eléctrico presentaba una analogía a la condición de la polarización magnética adquirida por el hierro suave al ser puesto en un campo magnético, Faraday introdujo el término de líneas de fuerza eléctrica, de forma similar a las de fuerza magnética.

"He usado las frases líneas de fuerza inductiva y líneas curvas de fuerza en un sentido solamente general, únicamente para hablar de las líneas de fuerza magnética. Las líneas son imaginarias, y la fuerza en cualquier parte de ellas, es por supuesto la resultante de un conjunto de fuerzas, cada molécula siendo relacionada a cada otra molécula en todas direcciones por la tensión y la reacción de aquellas que están cercanas."⁴⁸

De esta forma, las líneas de fuerza vienen a ser una representación de la transmisión de fuerzas por medio de las partículas contiguas.

La definición anterior no es suficiente para explicar el concepto que Faraday tenía sobre las líneas de fuerza. En su artículo "*On lines of Magnetic Force*" define las **líneas de fuerza magnética** como:

⁴⁸ Faraday, M., *Experimental Researches in Electricity*, v. I, p. 411.

" la línea que es descrita por una pequeña aguja magnética, cuando es movida tanto en la dirección de su longitud, a la cual la aguja es constantemente una tangente a la línea de movimiento,..."⁴⁹

Aunque, por otro lado, indicaba Faraday, las líneas no tenían una dirección determinada, porque están relacionadas al poder polar⁵⁰. Una de las características de las líneas de fuerza, era que, como se encontraban entre dos o más centros de fuerza magnética, sus formas podían ser muy variadas, además la suma del "poder" contenido en cualquier sección de una porción dada de las líneas, era exactamente igual a la suma del "poder" en cualquier otra sección de las mismas líneas.

Para Faraday, estas líneas constituían un buen método para representar la naturaleza, condición, dirección y cantidad de las fuerzas magnéticas, superando el método que representaba a las fuerzas como concentradas en centros de acción, tal y como los polos magnéticos.

Las líneas de fuerza magnéticas podían ser reconocidas por su acción sobre una aguja magnética o en un cuerpo conductor moviéndose a través de ellas. Los resultados de las dos acciones eran, en la aguja magnética atracciones y repulsiones, y en el conductor o cable en movimiento, la producción de una corriente de electricidad –dependiendo del número de líneas de fuerza cortadas por el conductor, era la intensidad de la corriente eléctrica-. El espacio alrededor de un imán estaba lleno de líneas de fuerza, siendo su concentración mayor en los polos y menor conforme la distancia a los polos aumenta. El conjunto de estas líneas define el campo magnético alrededor de un imán. Estas líneas podían rodear obstáculos.

Las líneas de fuerza podían corresponder a dos condiciones eléctricas. Las primeras correspondían a la condición estática de electricidad y estaban presentes en todos los casos de inducción. Estas terminaban en las superficies de los conductores bajo inducción, o en las partículas de los no conductores, los cuales al ser electrificados se encontraban en ésta condición; y podían ser afectadas por cuerpos con distintas capacidades de inducción. Faraday no estaba seguro de que esas líneas pudieran existir

⁴⁹ Faraday, M., *Experimental Researches in Electricity*, v. III, p. 328.

⁵⁰ Para Faraday, la polaridad era una condición del cuerpo como un todo; y se refería a qué tanto era afectado por las líneas de fuerza magnéticas en comparación con otros cuerpos expuestos a las mismas condiciones. Así, el poder polar era la capacidad de un cuerpo de ser afectado por las líneas de fuerza magnéticas, así como las distintas condiciones causadas por estas en las diferentes partes de su cuerpo.

en el vacío. Las segundas líneas de fuerza, estaban relacionadas a la electricidad dinámica y eran limitadas en su extensión por una condición inductiva de la electricidad estática, o podían ser infinitas y continuas, como curvas cerradas en el caso de un circuito voltaico. Podían expandirse, contraerse o ser deflectadas, dependiendo de la naturaleza y el tamaño del medio por el que pasaran.

De acuerdo con Faraday, las líneas de fuerza magnéticas respondían a tres características. La primera de ella es que no se veían afectadas por el medio, excepto por el hierro. Las líneas externas debían ser curvas en caso de una barra magnética rectangular, debido a que empiezan en un polo y terminan en otro. Si estas líneas existían no debía ser una sucesión de partículas como en el caso de la inducción eléctrica estática.

Para Faraday, el que la acción eléctrica o magnética entre dos cuerpos pudiera ser a distancia y en línea recta, era una parte de la teoría magnética que parecía imposible que hubiera sobrevivido. Hay que hacer notar que Faraday creía que las líneas de fuerza eran curvas, y que además entre ellas se ejercían una tensión lateral, producto de la acción de las partículas contiguas del dieléctrico, el cual bajo la acción magnética se encontraba en un estado de polaridad y tensión.

Por otro lado, Faraday relacionaba que las líneas de fuerza magnéticas fueran curvas con la existencia de ciertas condiciones en el espacio intermedio. Dicha condición no era una sucesión de partículas como en el caso de la inducción eléctrica estática. Aunque, después de todo "no hay prueba de la existencia de las líneas de fuerza, en el caso de un imán, excepto cuando los objetos utilizados experimentalmente para mostrar estas líneas, como la aguja magnética, hierro suave, un cable en movimiento, o un cristal de bismuto están presentes; que estos cuerpos ..."⁵¹

Las condiciones a las que Faraday se refería, eran aquellas que provocaban que las líneas de fuerza se curvaran, de cualquier otra manera, serían rectas ya que nada interferiría con ellas.

En 1830, Faraday empezó a investigar la naturaleza de la materia, puesto que de ella

⁵¹ Faraday, M. *Experimental Researches in Electricity*, v. III, p. 415.

dependía la propagación de las fuerzas electromagnéticas. Los temas en los que centró su investigación fueron la acción eléctrica y la polaridad de las partículas.

Después de sus investigaciones, Faraday llegó a una visión del átomo como un punto con una atmósfera de fuerza alrededor de él. Por lo tanto, la materia debía ser vista como un universo de poderes que llenan todo el espacio, o al menos el espacio sujeto a la gravitación. La fuerza a la que Faraday hace referencia es a la gravitatoria; ésta era la fuerza que constituía la materia. Esta teoría negaba la impenetrabilidad e indivisibilidad de los átomos, suponiendo la continuidad de la materia. La materia por tanto, debía llenar todo el espacio.

Esta nueva teoría de la materia, llevó a Faraday a una reconstrucción de su teoría de la propagación de las fuerzas. Ahora, en lugar de ver a un éter cuasi-material por medio del cual se propagaban las fuerzas, consideró que este éter debía ser visto como vibraciones de las líneas de fuerza. O la propagación de las fuerzas se debía a un estado de tensión del éter, equivalente a una condición estática o dinámica; o podría ser cualquier otro estado difícil de concebir. Las vibraciones de las líneas de fuerza eran concebidas como el trabajo de las partículas de materia al llevar la fuerza a través de la línea; pero cuando no había este tipo de partículas, la línea se propagaba por el espacio. Sin embargo, el que las líneas solamente se propagaran por el espacio también era considerado como vibraciones de éstas. El que las líneas de fuerza vibraran, le concedía al éter, cierta elasticidad.

El éter, tenía un papel importante en el comportamiento de los imanes, al respecto Faraday expresó:

“Creo que cuando un imán se encuentra en un espacio libre, existe un medio alrededor de él. Que un vacío tiene sus propias relaciones magnéticas de atracción y repulsión... Que este medio magnético circundante, aislado de todas las sustancias materiales, puede ser, no lo puedo decir, tal vez sea el éter. Me inclino a considerar este medio como *esencial* para el imán; esto es, el que relaciona las polaridades externas⁵² entre ellas por medio de las líneas curvas de poder; y que esté relacionado como una necesidad.”⁵³

El medio que rodeaba a los imanes no era homogéneo ni igual en poder magnético en cada área, antes bien era variable, lo cual lo hacía más compatible con la idea de las

⁵² Las polaridades externas a las que Faraday hace referencia, corresponden a los polos del imán.

⁵³ Faraday, M., *Experimental Researches in Electricity*, v. III, p. 425.

líneas de fuerza magnéticas, las cuales estaban bien definidas en cuanto a dirección y cantidad se refiere. Dicho medio era el encargado de sostener el estado o condición alrededor del imán; y éste estado era el que mostraba la constitución de las líneas de fuerza magnética.

Sin embargo, el éter no era indispensable al considerar las líneas de fuerza como las transmisoras de la interacción magnética.

Las líneas de fuerza ya no eran más representaciones del alineamiento de las partículas polarizadas, ahora eran la estructura de las sustancias materiales y sus interacciones, y llenaban todo el espacio. De acuerdo con Faraday, el término líneas de fuerza magnética era utilizado sólo para “expresar la dirección de la fuerza en cualquier lugar, y no ninguna idea física o noción de la manera en que la fuerza puede ser aplicada; como acción a distancia, pulsaciones, ondas o corriente..”⁵⁴ Este sentido era una interpretación basada en sus experimentos. Sin embargo, el que las líneas fueran el camino o el vehículo para la transmisión de las fuerzas, era el sentido que más le agradaba.

El término “polaridad” correspondería de ahora en adelante a la representación de la dirección de las líneas de fuerza en los campos de fuerzas.

Las diferencias en el carácter magnético de los distintos materiales serían equivalentes a la disponibilidad a que las líneas de fuerza atravesaran el material; esto es, la conductividad magnética de las líneas de fuerza en las diferentes sustancias.

Las interacciones entre las fuerzas fueron condicionadas a tener lugar sólo a través de líneas curvas, claro está bajo las condiciones del medio que había establecido en sus estudios sobre la materia.

Dentro de la teoría de Faraday resaltan algunas contradicciones que ya he señalado en su momento; también resaltan ciertas confusiones debido al cambio que hace al momento de referirse a las líneas de fuerza como caminos para la transmisión de la

⁵⁴ Faraday, M., *Experimental Researches*, citado en *Forces and Fields*, p. 202.

fuerza o transmisoras de la fuerza. Pero, hay que notar que se refiere a las líneas como caminos al tratar la inducción electrostática, y a las líneas como transmisoras para la inducción electromagnética. Esta confusión se debió a “que él nunca sintió que había podido demostrar la existencia de las líneas de fuerza electrostática de forma independiente a las partículas del medio dieléctrico, mientras que sintió que había podido demostrar de una forma más convincente la existencia independiente de las líneas de fuerza magnética.”⁵⁵

Faraday estaba conciente de la confusión que generaba al no especificar el sentido que daba al término “líneas de fuerza” a lo largo de sus publicaciones:

“...Algunas veces he utilizado el término líneas de fuerza de manera vaga, para dejar al lector dudando sobre si lo utilizo como un mera idea representativa de las fuerzas, o una descripción del camino en el que el poder era ejercido continuamente...”⁵⁶

Con la teoría desarrollada, Faraday introdujo dos representaciones del campo:

- 1. Las fuerzas electromagnéticas son mediadas por las partículas de un medio.*
- 2. El campo con líneas de fuerza como su elemento principal.*

Sin embargo, ninguna de estas dos logró dar una interpretación real de lo que es el campo eléctrico. Fueron Thomson y Maxwell los que intentaron explicar la teoría de propagación de fuerzas por medio de las teorías mecánicas del éter.

3.5. Ohm y Thomson

Dentro del siglo XIX los trabajos más importantes con respecto a la teoría electrodinámica fueron los de Faraday y Maxwell. Sin embargo, a la par del trabajo de estos dos científicos, también se ampliaron otras teorías que fueron complementando la electrodinámica. Dos de las personas que estuvieron a cargo de este desarrollo son Ohm y W. Thomson, quienes contribuyeron a la teoría sobre circuitos eléctricos, leyes de conducción, etc.

De esta forma, nuevos conceptos fueron complementando los estudios sobre

⁵⁵ Nersessian, N. , Faraday to Einstein: Constructing Meaning in Scientific Theories, p. 47.

⁵⁶ Ibidem, p. 58.

electromagnetismo. Aunque poco se estudió sobre la naturaleza de la corriente eléctrica pues, como he dicho anteriormente, en esta etapa se ve a la corriente más como causa de fenómenos (ej. Inducción) que como objeto de estudio, se observa el seguimiento y ciertas modificaciones de algunas concepciones del siglo XVIII sobre la electrostática. Un elemento importante, rescatado de dicho siglo, será la consideración de la existencia de una o dos electricidades, de lo cual dependían algunas de las suposiciones realizadas por algunos científicos sobre los efectos de un circuito en otro cercano.

Los trabajos de Georg Simon Ohm (1787 – 1854), surgieron de la suposición de que la deflexión de la aguja del galvanómetro debía ser proporcional a la corriente que fluía en el conductor. De esta forma, se dispuso a experimentar utilizando pilas termoeléctricas con el fin de que la corriente no variara demasiado durante las mediciones.

Ohm comparó la tensión de la corriente eléctrica a la pendiente por la que se desliza una corriente de agua, también comparó el flujo de electricidad en una corriente con el flujo de calor a lo largo de un cable. Él partió de la suposición de que la comunicación de electricidad de una partícula tiene lugar directamente hacia la que está más cercana a ella, entonces no hay transición inmediata de esta partícula a otra que se encuentre a gran distancia.

De estas comparaciones surge la analogía de caída, que de acuerdo con él, es la diferencia de tensión entre dos puntos alejados por cierta longitud. Cuando la tensión es mayor, se necesitará mayor trabajo para transportar la electricidad de un punto a otro, de modo que la fuerza electromotriz puede definirse con el trabajo efectuado por la cantidad de electricidad al pasar de un punto a otro. La ley formulada por Ohm de acuerdo con sus condiciones experimentales establecía que a una temperatura dada, la intensidad de la corriente que circulaba entre dos puntos del hilo era proporcional a la tensión aplicada. En esta ley, la constante de proporcionalidad corresponde a la resistencia eléctrica del hilo. Kohlrausch demostró que para hilos de diferentes metales las caídas de tensión eran proporcionales a la resistencia específica del alambre conductor y a su longitud, e inversamente proporcionales a su sección.

Ohm reconoció que las corrientes eléctricas no se encontraban confinadas a las superficies de los conductores, antes bien los penetraban.

El primer trabajo de William Thomson (1824-1907), en la teoría de la electricidad entre 1840 y 1850 fue la exploración de la analogía matemática entre la conducción eléctrica y térmica. Él comparó la distribución de la fuerza electrostática en una región que contenía conductores electrificados, con la distribución del calor en un sólido infinito; las superficies equipotenciales en el primer caso corresponderían a las superficies isotérmicas del otro y la carga eléctrica correspondería a la fuente de calor.

Por otro lado, el modelo físico de la propagación del calor de partícula a partícula sugería una propagación análoga de las fuerzas eléctricas por la acción de partículas contiguas de algún medio que intervenía al igual que en la teoría de Faraday, en la que la propagación de las fuerzas electrostáticas se realizaba por medio de las partículas contiguas del medio dieléctrico.

La analogía entre la conducción del calor y la eléctrica llevó a Thomson a darse cuenta del hueco que había entre la representación matemática y la física del fenómeno.

Thomson hizo notar que Faraday no había dado una explicación del mecanismo de interacción entre las partículas contiguas del medio dieléctrico.

En 1896 y a través de una analogía entre el campo eléctrico y el desplazamiento de los elementos de un sólido elástico bajo tensión; Thomson asoció el campo eléctrico con los desplazamientos del equilibrio. En su obra "*Mechanical representation of electric, magnetic, and galvanic forces*" (1847), consideró la propagación de las fuerzas eléctricas y magnéticas en términos de esfuerzos lineales o rotacionales de un sólido elástico, utilizando el método desarrollado por Stokes. A pesar de esta consideración, la relación entre los esfuerzos y la propagación de las fuerzas eléctricas y magnéticas no estaba clara.

Thomson regresó a la interpretación que Faraday tenía del campo magnético como una estructura de líneas de fuerza. Así, en su artículo "*A mathematical theory of magnetism*" (1851) describió el campo magnético como "una continua distribución en el espacio de una materia magnética imaginaria".⁵⁷ Esta materia magnética no era concebida por Thomson como una sustancia material, antes bien era una encarnación de la teoría de

⁵⁷ Harman, P. Energy, Force, and Matter The conceptual development of nineteenth-century Physics, p. 82.

Faraday de las líneas de fuerza, un todo que representaba la distribución espacial del campo de fuerza, permitiendo una expresión matemática de las líneas de fuerza en el espacio.

Como mencioné anteriormente, el trabajo de Thomson se desarrolló a la par que el de Maxwell y otros científicos. Por esta razón se pueden identificar durante este período dos corrientes sobre la consideración de los fenómenos electromagnéticos. La primera corriente se encuentra representada por Thomson y Maxwell, y consistía en la atribución de un carácter lineal a la fuerza eléctrica y la corriente eléctrica, y un carácter rotatorio al magnetismo. La segunda se encontraba representada por *Hermann von Helmholtz* (1821 – 1894), el cual veía a la fuerza magnética como lineal y a la corriente eléctrica como un fenómeno rotatorio.

Thomson asoció el carácter rotatorio al campo magnético, debido a que este producía una rotación en el plano de polarización de la luz; mientras que Maxwell asoció el carácter lineal de la corriente con la electrólisis. Para Thomson “el éter podría ser un fluido continuo que permeaba los espacios entre las moléculas de los cuerpos o podría estar constituido de moléculas discretas, o posiblemente toda la materia era continua, y su aparente estructura molecular ser producida por el movimiento vortical del continuo éter”.⁵⁸ Dicho éter, era una sustancia incompresible, capaz de resistir las rotaciones, donde la fuerza eléctrica era representada por la velocidad de traslación del medio.

De acuerdo con Whittaker⁵⁹, Thomson parece haber basado sus ideas de la propagación de perturbaciones eléctrica en el caso que era familiar para él: la transmisión de señales a lo largo de un cable. Él se apegó a la idea de que en tales perturbaciones, el cable era el medio de transmisión, mientras que para Maxwell, el cable solamente guiaba la perturbación, la cual residía en el dieléctrico que lo rodeaba.

⁵⁸ Harman, P. *Energy, Force, and Matter The conceptual development of nineteenth-century Physics*, p. 83.

⁵⁹ Whittaker, E. *A history of the theories of aether and electricity*, p. 245.

3.6. Maxwell

A pesar de que el trabajo más conocido de James Clerk Maxwell (1831 – 1879) es el que realizó al desarrollar las ecuaciones que describen los campos eléctrico y magnético, también llevó a cabo experimentos sobre electrostática, considerando con ellos la naturaleza de la corriente eléctrica. De igual forma, realizó publicaciones sobre la naturaleza del magnetismo.

Estos dos elementos le ayudaron a formar la base de su teoría electromagnética.

3.6.1. Electricidad: corriente eléctrica

Maxwell reconocía la distinción entre electricidad vítrea y resinosa que se había establecido en el siglo XVII, a las cuales se les había nombrado por convención positiva y negativa respectivamente. Así mismo, sus observaciones lo llevaron a establecer que “ninguna fuerza, ya sea atractiva o repulsiva, puede ser observada entre un cuerpo electrificado y uno no electrificado. Cuando, en algún caso cuerpos que no han sido previamente electrificados interactúan con un cuerpo electrificado, se debe a que han sido electrificados por inducción.”⁶⁰ La observación anterior fue lo que lo llevó a sus estudios en electrificación por inducción y conducción. En el experimento de electrificación por conducción, Maxwell utilizó un cable de metal para tocar simultáneamente un objeto electrificado por inducción y otro no electrificado. De esta forma, logró electrificar el objeto no electrificado, llamando al cable de metal **conductor de electricidad**.

Aunque estos experimentos ya habían sido llevados a cabo previamente, es importante resaltar la labor que hace Maxwell, al reunirlos en su libro “*A treatise on electricity and magnetism*”, dándoles una secuencia y conectando todos estos experimentos, así como ampliando las explicaciones y el formalismo matemático que hasta entonces se habían desarrollado.

⁶⁰ Maxwell, J. *A treatise on electricity and Magnetism*, vol. I, p. 33.

Maxwell afirmaba que la electricidad no se podía aniquilar ni crear, de tal forma que si la cantidad total de electricidad de un cuerpo dentro de una superficie cerrada aumentaba o disminuía, esta cantidad de electricidad debía haber pasado a través de la superficie cerrada. De esta forma, afirmaba que la electricidad no era una forma de energía, antes bien, que si se multiplicaba la cantidad de energía de un sistema por otra cantidad a la que llamó Potencial, se obtendría la cantidad de energía del sistema en cuestión.

Maxwell construyó dos teorías acerca de la electricidad: la **teoría de dos fluidos** y la **teoría de un fluido**. Cabe mencionar que la teoría de dos fluidos había sido propuesta anteriormente por Ampère.

En la **teoría de dos fluidos**, propone que todos los cuerpos sin electrificar poseen la misma cantidad de electricidad positiva y negativa. Si se desea electrificar dos cuerpos con las características anteriores, se deberá tomar una cierta cantidad de electricidad positiva o negativa de uno de los cuerpos y comunicársela al otro, al mismo tiempo que se toma cierta cantidad de electricidad opuesta del segundo cuerpo para comunicársela al primero. La electricidad que fue transferida de un cuerpo a otro, recibe el nombre de **electricidad libre**, y aquella que no fue movida del cuerpo, de la cual el cuerpo tiene igual cantidad positiva y negativa, recibe el nombre de **electricidad combinada o latente**.

Maxwell llamaba a estas electricidades "fluidos, porque son capaces de ser transferidos de un cuerpo a otro, y son, dentro de los cuerpos conductores extremadamente móviles".⁶¹

La **teoría de un fluido**, es en todo igual a la de dos fluidos; sólo que en lugar de suponer que hay dos sustancias iguales y opuestas en todos los aspectos, se le ha dado a la electricidad negativa tanto el nombre como las propiedades de la **materia ordinaria**, mientras que la electricidad positiva guarda el nombre de **fluido eléctrico**. Así, las partículas del fluido eléctrico se repelen entre sí, de acuerdo a la ley del cuadrado inverso de la distancia, al tiempo que atraen a las partículas de la materia de acuerdo con la

⁶¹ Maxwell, J. A treatise on electricity and magnetism, vol. I, p. 40.

misma ley; mientras que, las partículas de la materia ordinaria, se repelen entre ellas y atraen a las de electricidad.

Se puede observar, que con la teoría de un fluido, Maxwell hace referencia a las partículas de los fluidos eléctricos, es decir, reconoce que aquello que llama electricidad está compuesto por partículas. Esta visión es similar a la propuesta por Franklin. Aunque Maxwell nunca incluyó abiertamente, estas partículas de electricidad dentro de su teoría, antes bien, prefirió mantener la concepción de corriente como la de un fluido.

Los científicos de la época, entre ellos Kelvin y el propio Maxwell habían notado que las teorías de fluidos y la de termodinámica tenían algunas analogías con la teoría eléctrica. Sin embargo, Maxwell siendo cauteloso de estas analogías, expresó:

".. podemos encontrar ayuda en estas analogías para formar ideas claras sobre las relaciones formales entre las cantidades eléctricas, pero debemos ser cuidadosos de no dejar que la analogía nos sugiera que la electricidad es una sustancia como el agua, o un estado de agitación como el calor."⁶²

De esta forma, Maxwell explicaba en lo que consistía la corriente eléctrica a través de un material conductor de la siguiente manera:

"En el fenómeno llamado **corriente eléctrica**, el paso constante de electricidad a través del medio tiende a restaurar el estado de polarización tan rápido como lo permite la conductividad del medio. Entonces, el agente externo que mantiene la corriente siempre está realizando trabajo en restaurar la polarización del medio, el cual se relaja continuamente, y la energía de esta polarización es transformada en calor, de tal forma que el resultado final de la energía gastada en mantener la corriente es el aumento de temperatura del conductor, tanto calor se pierde por conducción y radiación de su superficie como la que se genera al mismo tiempo por la corriente eléctrica."⁶³

Los experimentos que dejaban al descubierto la acción entre circuitos, revelaban que un circuito por el cual circula una corriente, tiene una capacidad de realizar un trabajo. Lo cual implicaba que la corriente eléctrica tiene un tipo de energía. "La energía de la corriente eléctrica es o del tipo de energía que consiste en el movimiento de materia, o aquella que consiste en la capacidad de ser puesto en movimiento, proveniente de fuerzas actuando entre cuerpos situados en ciertas posiciones uno relativo al otro."⁶⁴

Por esta razón, Maxwell aseguraba que la corriente eléctrica no podía ser vista, sino

⁶² Maxwell, J. A treatise on electricity and magnetism, vol. I, p. 79.

⁶³ Ibidem, p.168.

⁶⁴ Maxwell, J. A treatise on electricity and magnetism, vol. II, p. 211.

como un fenómeno cinético. Él decía que Faraday había encontrado adecuado el uso de los términos corriente eléctrica y fluido eléctrico, puesto que hablaban muy bien de “algo” que se mueve y no solamente un arreglo fijo.

Con respecto a la velocidad de la corriente, Maxwell declaraba que era muy poco lo que en realidad sabían al respecto, y que además la convención que le habían asignado en cuanto a dirección positiva o negativa tal vez no correspondía a como en realidad se movía la corriente. Todo lo que se conocía hasta ese momento, es que la corriente implicaba algún tipo de movimiento, cuya causa era la fuerza electromotriz. Sin embargo, tampoco se tenían características exactas de la fuerza electromotriz; se sabía que actuaba solamente sobre la electricidad y no sobre los cuerpos, como en el caso de las fuerzas mecánicas.

Al desarrollar el formalismo matemático, Maxwell se dio cuenta de que el movimiento de la corriente eléctrica debía estar ligado con su intensidad. Esta materia en movimiento, “lo que sea, no está confinada en el interior de los conductores que llevan la corriente, probablemente se extiende por todo el espacio que los rodea.”⁶⁵

Algo que caracterizó el trabajo de Maxwell, fue el énfasis que realizó en tomar la analogía entre la corriente eléctrica y cualquier fluido material, sólo como lo que era: una analogía. De tal forma que debía evitarse cualquier suposición que no fuera garantizada por alguna evidencia experimental, ya fuera la suposición de que la corriente era algún fluido material o de que su velocidad fuera un cierto número de pies por segundo. Al no saber estas características de la corriente, era tomada como un fenómeno debido a una causa incierta.

⁶⁵ Maxwell, J. A treatise on electricity and magnetism, vol. II, p. 215.

3.6.2. Magnetismo

Maxwell establece en su “*A treatise on electricity and magnetism*”, algunas de las propiedades de los imanes, entre ellas, que la repulsión entre dos polos magnéticos iguales se ejercía a lo largo de la línea recta que los unía.

Por otro lado, la ley de fuerzas entre dos cantidades de magnetismo tenía la misma forma matemática que aquella ley de fuerzas entre dos cantidades iguales de electricidad, por lo que el magnetismo debía tratarse igual que la electricidad.

Otra de las propiedades de los imanes que Maxwell describe, es que en medio de los imanes no existen las propiedades magnéticas, sin embargo, al cortar cualquier imán por la mitad, se encuentra que ambos imanes tienen un polo magnético en el lugar donde se realizó el corte.

De esta forma, es imposible, de acuerdo con Maxwell, lograr que un imán tenga polos desiguales, es decir, con diferentes cantidades de magnetismo.

Utilizando las características anteriores, Maxwell llega a la conclusión de que “se puede considerar a los imanes, ... como hechos de pequeñas partículas, cada una de las cuales tiene dos polos iguales y opuestos.”⁶⁶

Debido a que las leyes de fuerzas magnética y eléctrica son semejantes, la acción magnética, decía Maxwell, debía ser igual a la eléctrica. Por tanto, él utilizó la **teoría de un fluido y la de dos fluidos** para describir la **acción magnética**. Así, podía explicarse la acción magnética por medio de la existencia de uno o dos fluidos, aunque nuevas leyes fueron introducidas. Una de ellas consistía en que los fluidos magnéticos no podían pasar de una molécula o partícula a otra de un imán, antes bien, según Poisson, el proceso de magnetización consistía en la separación de cierta cantidad de los dos fluidos dentro de cada partícula, causando que hubiera mayor concentración de un fluido en uno de los extremos de la partícula que en el extremo contrario.

El proceso por el que una partícula es magnetizada, es similar al de la electrización de una partícula. Una fuerza magnética puede producir dos clases de magnetismo a una partícula inicialmente neutra, y cada clase de magnetismo aparece en extremos opuestos

⁶⁶ Maxwell, J. *A treatise on electricity and magnetism*, vol. II, p.5.

de la partícula.

El término de **polarización** fue incluido en la explicación del magnetismo, para explicar lo que sucedía con las partículas de los materiales magnéticos. Este término fue utilizado para expresar que una partícula tuviera propiedades opuestas en la misma cantidad en sentidos opuestos (como la cantidad de magnetismo, que es la misma, en ambos extremos de un imán pero son de sentidos opuestos). Sin embargo, dicho término también fue utilizado para describir la influencia de un campo electromagnético sobre un dieléctrico, como veremos más adelante.

Cada una de las partículas del imán debía estar magnéticamente polarizada, de tal forma que tuviera un eje de magnetización, y otras propiedades que también se le atribuían al imán completo, tal y como la intensidad de magnetización o el momento magnético.

Dadas las características anteriores, Maxwell representó la acción de un imán como "la acción debida a una distribución de "materia magnética", debemos recordar siempre que es sólo un método artificial de representar la acción de un sistema de partículas polarizadas."⁶⁷

Hay que mencionar que a lo largo de su "*A treatise on Electricity and Magnetism*", Maxwell cambia de posición respecto a la naturaleza del magnetismo, con el fin de evitar contradicciones. Así, el modelo de magnetismo que había establecido en el cual considera a los imanes como un cuerpo continuo y homogéneo, en el cual la parte más pequeña posee las mismas propiedades y características que el todo, es abandonado, por el modelo en el que el imán contiene un número finito pero muy grande de circuitos eléctricos, de tal forma que su estructura es ahora molecular y no continua. Esta última, corresponde a la teoría de Ampère sobre el magnetismo.

Una vez que se tiene la explicación de la naturaleza de la electricidad y del magnetismo, es necesario comprender otros fenómenos, de los cuales partieron tanto Faraday como Maxwell para llegar al concepto de campo. Uno de estos fenómenos es la inducción magnética.

⁶⁷ Maxwell, J. A treatise on electricity and magnetism, vol. II, p. 11.

Hay que recordar que Maxwell había considerado a los imanes como una distribución de partículas magnéticas situadas en la superficie del imán.

También reconocía que “un cuerpo magnetizado en virtud de la acción de una fuerza magnética es magnetizado por inducción, y la magnetización es inducida por la fuerza magnética.”⁶⁸

Para no hablar de fluidos magnéticos, *Wilhelm Eduard Weber* (1804 – 1891) asumió que las moléculas del metal siempre eran imanes, es decir, que en ellas existían corrientes moleculares permanentes cuyo origen no se debía a la inducción; pero que los ejes magnéticos de las moléculas siempre se encontraban en direcciones al azar, de tal forma que no exhibían propiedades magnéticas. Una vez que una fuerza magnética era aplicada, las moléculas se alineaban en una sola dirección, exhibiendo así las propiedades magnéticas. De esta forma, la magnetización no era un proceso que involucrara grandes piezas de metal, sino que correspondía a un proceso molecular.

Con la suposición de las corrientes eléctricas moleculares, quedaba refutada la hipótesis sostenida por Maxwell, entre otros, de la existencia de los fluidos magnéticos.

Con respecto a la naturaleza de las corrientes eléctricas moleculares, Weber supuso que estaban constituidas por una carga eléctrica moviéndose en una órbita alrededor de una carga eléctrica fija de signo opuesto. Con Weber se inicia el estudio de la corriente eléctrica basada en el aspecto molecular de la materia, el cual dejó inconcluso, y respondió a la explicación del fenómeno de la corriente eléctrica en cables metálicos.⁶⁹ De esta nueva visión de la corriente hablaré en el siguiente capítulo.

Maxwell utilizó parcialmente la teoría de las moléculas previamente magnetizadas de Weber, para desarrollar la parte matemática sobre los cálculos del momento magnético de un imán. Sin embargo, no le pareció suficiente, ya que no daba cuenta de la magnetización que quedaba después de que el metal era retirado de la fuerza magnética.

De la inducción electromagnética descubierta por Oersted, Maxwell decía que:

“en el espacio alrededor de un alambre que transmite una corriente eléctrica, un imán es

⁶⁸ Maxwell, J. A treatise on electricity and magnetism, vol. II, p. 49.

⁶⁹ Whittaker, E., A history of the theories of aether and Electricity, p. 418.

influenciado por las fuerzas dependiendo de la posición del alambre y de la intensidad de la corriente. El espacio en el cual estas fuerzas actúan debe ser considerado como un campo magnético..."⁷⁰.

Las líneas de fuerza magnética, se encontraban en todos lados formando ángulos rectos con el cable.

3.6.3. Modelos mecánicos del éter

Ya que he descrito los principales conceptos bajo los cuales se sentaron las bases para desarrollar el concepto de campo, y que de igual forma contribuyeron a las ecuaciones de campo, es oportuno describir la concepción de campo y transmisión de éste que Maxwell poseía. Cabe mencionar que en esta etapa (s. XIX) se desarrollaron varios modelos sobre la propagación del campo, sin embargo sólo mencionaré el más importante.

Antes de describir el modelo mecánico que Maxwell tenía sobre el campo, es importante mencionar que, fue el trabajo de Faraday quien lo llevó a modelar una visión mecánica del problema. Lo que más interesaba a Maxwell de la teoría de Faraday eran las líneas de fuerza:

"Faraday veía a estas líneas para expresar no sólo la dirección de la fuerza magnética, si no ... él mostraba cómo concebir la unidad de líneas de fuerza... Él muestra cómo el fenómeno producido por la variación en la intensidad de una corriente o un imán puede ser explicado, mediante la suposición que el sistema de líneas de fuerza se expande o contrae a lo largo del cable o el imán mientras que su poder va cambiando.."⁷¹

De esta forma Maxwell exploró las implicaciones geométricas de las líneas de fuerza, y desarrolló un modelo físico de las partículas del éter para representar la transmisión de la acción del campo por las partículas contiguas del éter.

Primero, consideró las líneas de fuerza como líneas del flujo de un líquido. Las líneas de

⁷⁰ Maxwell, J. A treatise on electricity and magnetism, vol. II, p. 139.

⁷¹ Ibidem, p. 188.

fuerza representaban la dirección de un vector; la magnitud del vector en cualquier lugar era inversamente proporcional a la sección transversal de un tubo delgado formado por dichas líneas. Esta analogía había sido ya sugerida por Faraday con anterioridad, quien decía que a lo largo de las líneas de fuerza magnética debía haber una condición dinámica similar a la de la corriente eléctrica, y que de hecho las líneas de fuerza magnética eran corrientes.

En su artículo "*On Faraday's lines of force*", Maxwell declara haberse apropiado de la visión de Faraday de la polaridad magnética como una propiedad del campo magnético o del espacio y la notación general de líneas de fuerza. Para explicar la intensidad de la fuerza, supuso un fluido incompresible moviéndose en una tubería formada por las líneas de fuerza. Hay que resaltar que este fluido de acuerdo con Maxwell tenía una serie de propiedades imaginarias.

El modelo mecánico anterior completo, consistía en vórtices que formaban parte de un fluido incompresible en un estado de estrés. Cada vórtice estaba separado de sus vecinos por una capa de esferas (identificadas como partículas de electricidad), la cual giraba en sentido contrario de los vórtices. Gracias a las esferas que separan los vórtices, el movimiento de rotación de cada vórtice haría que su vecino se moviera en la misma dirección.

Las esferas se moverían siempre que los vórtices vecinos tuvieran diferente velocidad angular; el movimiento de las esferas corresponde al flujo de corriente eléctrica en un conductor en un campo magnético no homogéneo, y su desplazamiento en un medio aislador producía los efectos dieléctricos. La relación entre la corriente eléctrica y la fuerza magnética era de carácter cinemático. El mecanismo anterior se aplicaba tanto a la propagación del campo en el vacío y a través del éter.

En el artículo "*On physical lines of force*", deja clara su oposición a la concepción de la propagación de las fuerzas como un resultado de la acción a distancia, la cual provenía de la observación de la alineación de la limadura de hierro en presencia de un imán.

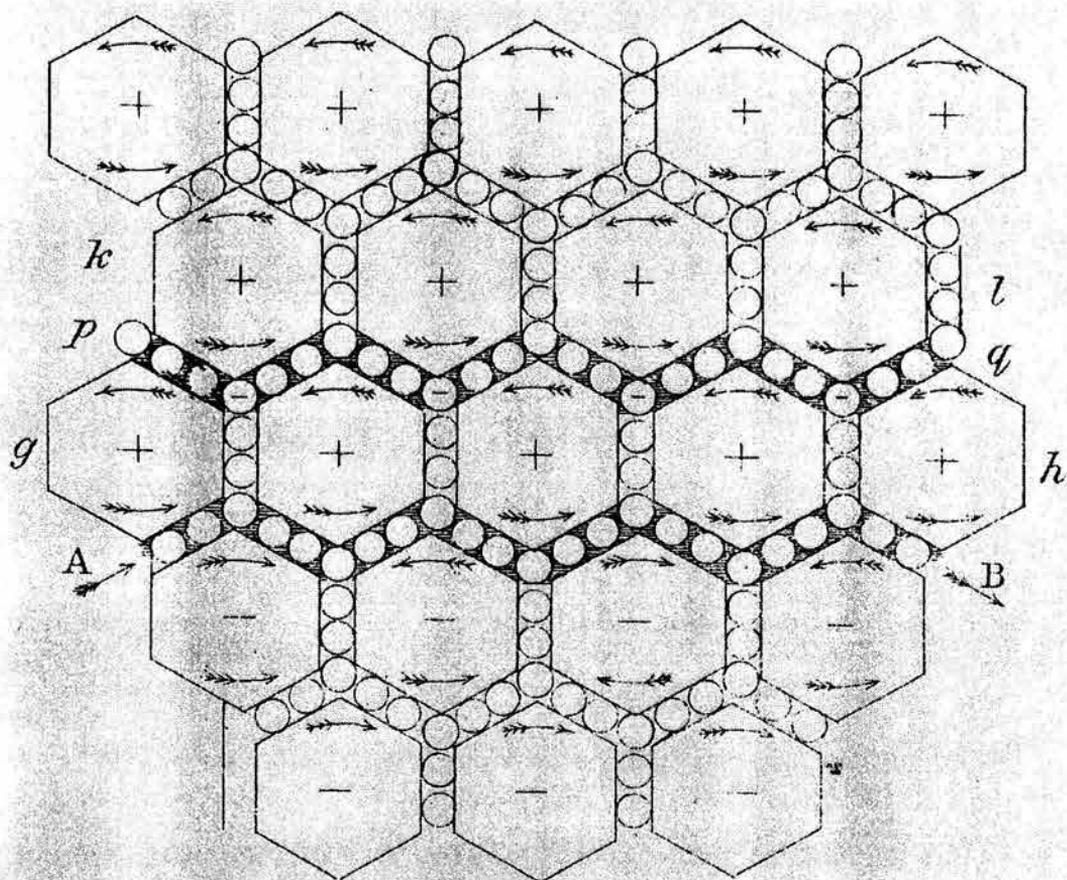


Figura 1. Representación de Maxwell de la propagación del campo.

Si por alguna causa la velocidad de rotación de cualquier vórtice era alterado, la perturbación se propagaría de cualquier parte del modelo a las demás partes, por medio de la acción mutua de las partículas y los vórtices. De igual forma, si las células se ponían en rotación, el medio ejercía un estrés equivalente a la presión hidrostática, combinada con una tensión longitudinal a lo largo de las líneas de los ejes de rotación.

En el modelo anterior, se puede notar la hipótesis a la que Maxwell adhirió su teoría, y es que las fuerzas mecánicas (newtonianas) en el medio son las que se encargan de producir los fenómenos eléctricos y magnéticos.

El estado de **estrés** fue utilizado por Maxwell en repetidas ocasiones, para referirse a la condición de los distintos medios en los que se propagaba un campo eléctrico; cuando hablaba de fluidos, Maxwell lo concebía como la "acción y reacción entre partes consecutivas de un cuerpo, y consiste en general de presiones o tensiones diferentes en diferentes direcciones en el mismo punto del medio."⁷² Aunque "la naturaleza de este estrés es una tensión a lo largo de las líneas de fuerza combinado con una presión igual en todas direcciones a ángulos rectos a las líneas"⁷³.

Maxwell extendió el mecanismo para que diera cuenta del fenómeno electrostático. Para este propósito, asumió que las partículas, cuando estaban desplazadas de su posición de equilibrio en cualquier dirección, ejercían una acción tangencial sobre la sustancia elástica de las células, y esto daba paso a la distorsión de ellas, lo cual daba a su vez origen a una fuerza proveniente de su elasticidad, igual y opuesta a la fuerza que había desplazado a las partículas de su posición de equilibrio. Cuando dicha fuerza era retirada, las partículas regresaban a su posición de equilibrio. El estado del medio, en el cual las partículas eléctricas eran desplazadas, representaba el campo eléctrico. El desplazamiento de las partículas no constituía en sí una corriente; sin embargo, las variaciones en el desplazamiento sí eran consideradas como corrientes, en dirección positiva o negativa dependiendo si el desplazamiento aumentaba o disminuía.

La concepción del estado electrostático como el desplazamiento de algo fuera de su equilibrio, no había sido antes presentado como lo hizo Maxwell. Faraday había supuesto como vimos anteriormente, que cuando un dieléctrico era expuesto a un campo electrostático, había un desplazamiento de la carga eléctrica en cada uno de los pequeños conductores. El movimiento de dichas cargas cuando el campo era variado, daba lugar a una corriente eléctrica; de aquí que Maxwell considerara las variaciones del desplazamiento como una corriente eléctrica. Sin embargo, a diferencia de Faraday quien sólo consideraba el desplazamiento en los dieléctricos, Maxwell consideraba dichos desplazamientos ya fuera en presencia o no de materia alguna. Cabe resaltar que, "el término desplazamiento ... tal vez no fue elegido apropiadamente; lo que en los primeros

⁷² Nersessian, N. *Faraday to Einstein: Constructing Meaning in Scientific Theories*, p. 77.

⁷³ Maxwell, J., *A treatise on electricity and magnetism*, vol. I, p. 63.

modelos de éter fue presentado como un desplazamiento, en investigaciones posteriores fue concebido como un cambio en la estructura en lugar de la posición de los elementos en el éter.”⁷⁴

El modelo de éter que Maxwell había diseñado, tenía la intención de describir lo que sucedía con las partículas más pequeñas de la naturaleza. Dicho así, quedaba la duda de la naturaleza del éter, es decir, si el éter era continuo o discreto.

Una vez que Maxwell hubo realizado los modelos mecánicos para la descripción del éter, Maxwell decidió dejarlos de lado, de tal forma que la teoría de campo se desarrollara independientemente, sin la suposición de ningún modelo mecánico, dando paso a un cambio en el desarrollo del concepto de campo.

3.6.4. La corriente de desplazamiento

Una parte importante de la teoría de Maxwell, resultado de la teoría mecánica del éter y que se vio reflejada en las ecuaciones de campo fue la introducción del concepto de corriente de desplazamiento, de la que se comenzó a hablar en el apartado anterior.

El origen de la corriente de desplazamiento se encuentra en la polarización de los dieléctricos al ser expuestos a un campo eléctrico, y es una necesidad de reconciliar las leyes del electromagnetismo con la existencia de corrientes eléctricas que no son cerradas -como la corriente en un circuito que incluye un capacitor-.

El modelo mecánico del éter que describí en el apartado anterior, fue también utilizado por Maxwell para interpretar la polarización de un dieléctrico. Así, la polarización podía ser representadas por las células y las partículas en un estado estacionario pero siendo capaces de sufrir una distorsión elástica o desplazamiento.

La **polarización** de una porción de un dieléctrico es “un estado forzado en el que el medio es influenciado por la acción de una fuerza electromotriz, y que desaparece

⁷⁴ Whittaker, E., A history of the theories of aether and Electricity, p. 250.

cuando la fuerza desaparece.⁷⁵ Así, la polarización consiste en un desplazamiento eléctrico producido por la intensidad electromotriz. Cuando una fuerza electromotriz actúa sobre un dieléctrico, produce en él una corriente, pero como el medio es no conductor la corriente no puede fluir a través del medio. Sin embargo, la electricidad es desplazada dentro del medio en dirección de la fuerza electromotriz, y el grado de desplazamiento dependerá de la intensidad de la fuerza electromotriz. El desplazamiento es medido mediante la cantidad de electricidad que cruza una unidad de área.

Es importante resaltar que el desplazamiento en las partículas no forma una corriente, sino la variación del desplazamiento eléctrico, es decir, si la fuerza electromotriz varía, el desplazamiento eléctrico también lo hará. De esta forma, los cambios en el desplazamiento eléctrico constituyen la corriente de desplazamiento. Para Cushing, la corriente de desplazamiento se aplica tanto para un medio dieléctrico como para un "vacío" lleno de éter.⁷⁶

La corriente debido a la variación del desplazamiento eléctrico, fue lo que Maxwell llamó corriente de desplazamiento. Con ello, dejó claramente expuesta su visión de lo que correspondía a una **corriente eléctrica: un desplazamiento de electricidad**. Sin embargo, aunque no daba la explicación de lo que era la electricidad, sí expresaba su creencia de que la electricidad debía estar constituida de partículas.

De acuerdo con Maxwell, sólo existen corrientes cerradas, ya que la corriente discontinua es completada por la corriente de desplazamiento dentro del dieléctrico de un condensador, aunque también sucede si es espacio vacío.

Con la corriente de desplazamiento, se hacía explícito uno de los principios de la teoría de Maxwell: "las corrientes de conducción no son el único tipo de corrientes".⁷⁷ De acuerdo con Nersessian, al introducir la corriente de desplazamiento en sus ecuaciones, Maxwell dejaba abierta la posibilidad de que la electricidad estática produjera efectos magnéticos. Sin embargo, él no exploró dicha posibilidad en ninguna de sus publicaciones.

⁷⁵ Maxwell, J., A treatise on electricity and magnetism, vol. I, p. 65.

⁷⁶ Cushing, J. Philosophical concepts in Physics. The historical relation between Philosophy and Scientific Theories, p. 197.

⁷⁷ Whittaker, E., A history of the theories of aether and Electricity, p. 256.

3.6.5. Modelo de campo

Al principio, Maxwell tomó las concepciones de Faraday referentes a las acciones magnéticas y electrostáticas. Hay que recordar que Faraday se inclinaba por una acción de transmisión continua; lo cual apoyaba con su representación de las líneas de fuerza como transmisoras de la fuerza magnética.

Por esta razón, Maxwell asumió que el fenómeno electromagnético era producido por el movimiento de las partículas de la materia, y que la acción era propagada por el campo por medio de un mecanismo complicado capaz de realizar una gran variedad de movimientos.

El desarrollo de la teoría de campo electromagnético, tenía dos metas, la primera era interpretar la acción a distancia y la segunda, interpretar la acción por contacto; de forma tal que ambos conceptos fueran relevantes para la física. Maxwell no dejaba de lado ninguna de las dos formas de acción, ya que consideraba que lo importante era el desarrollo de las teorías temporales como una guía experimental que ayudaría al progreso de las teorías hasta que apareciera la verdadera, y por otro lado, daría dos formas de conceptualizar el mismo fenómeno.

Kelvin ya había demostrado en 1842 que el mismo formalismo matemático podía utilizarse para expresar las leyes del flujo de un fluido, o el flujo del calor, para el fenómeno eléctrico y magnético y para la elasticidad. De esta forma, una fuente de calor, es análoga a la fuente de carga eléctrica; las líneas de flujo eran similares a las de fuerza, etc. Sin embargo, Kelvin resaltó que ninguna hipótesis física podía ser deducida a través de estas analogías.

Las analogías que Maxwell tomó prestadas de Thomson, lo llevaron a varias hipótesis; la primera era que había un tiempo de retraso en la transmisión de las acciones eléctricas y magnéticas, y que la luz era un fenómeno electromagnético.

Maxwell aclaró que la única propagación en el tiempo que era posible concebir, era la propagación del estrés o movimiento en el medio:

"cualquiera que sea el momento en el que la energía es transmitida de un cuerpo a otro en el tiempo, debe haber un medio o sustancia en el cual la energía exista después que ha dejado un cuerpo y antes que alcance el otro.... Todas estas teorías llevan a la concepción de un medio en el que la propagación se lleva a cabo, y si no admitimos este medio como una hipótesis, creo que debería ocupar un lugar prominente en nuestras investigaciones, y debemos construir una representación mental de todos los detalles de esta acción..."⁷⁸

Las líneas de fuerza dentro de la analogía eran consideradas como las líneas de flujo de un fluido incompresible, y tenían algunas características. En primer lugar, siempre iban de un lugar de mayor potencial a uno de menor potencial. Estas no podían regresar sobre sí mismas, es decir, debían tener un principio y un fin. El principio de una línea de fuerza tenía que estar situado en un lugar de carga positiva y su final en una superficie negativa.

El término de líneas de fuerza, fue utilizado por Maxwell, porque Faraday y otros investigadores lo habían utilizado, pero de acuerdo con él, el término correcto debía ser **líneas de inducción eléctrica**.

Las líneas de inducción indican la dirección y la magnitud de la intensidad electromotriz resultante en cada punto, debido a que ambas cantidades van en la misma dirección y tienen la misma proporción. Hay que resaltar que estas líneas indicaban la inducción primeramente, y que la intensidad estaba indicada por las líneas equipotenciales; por lo que las líneas de inducción resultan ser perpendiculares a estas últimas.

La acción continua significaba en la teoría de Maxwell que cada punto del espacio podía ser caracterizado por alguna cantidad matemática que representara la energía presente en dicho lugar, sin implicar que algún evento mecánico se estuviera llevando a cabo.

Por otro lado, la **tensión eléctrica** fue definida por Maxwell como:

"En este sentido, la tensión eléctrica es una tensión del mismo tipo, y medida en la misma manera que la tensión en una cuerda, y el medio dieléctrico, puede soportar cierta tensión y no más..."⁷⁹

La definición de tensión eléctrica, corresponde a una comparación entre la tensión que presentan los cuerpos sólidos y la tensión que presenta un medio sujeto a la presencia de un campo eléctrico.

Maxwell no hizo ninguna distinción entre el estrés en el material dieléctrico y el estrés en

⁷⁸ Maxwell, J., A treatise on electricity and magnetism, vol. II, p. 493.

⁷⁹ Maxwell, J., A treatise on electricity and magnetism, vol. I, p. 64.

el éter; antes bien, al suponer que los cuerpos materiales al ser desplazados cargan el éter contenido con ellos, no se podía hacer una distinción. Cabe mencionar que él consideraba a la materia como una modificación del éter, de tal forma que como he dicho, ambos debían moverse juntos.

Sin embargo, los seguidores de Maxwell realizaron algunas modificaciones; el estrés asignado al éter, sería distinto del estado de estrés asignado a la materia ponderable⁸⁰.

Maxwell argumentó que el campo sólo podía existir en conexión con sustancias materiales, así concluyó que el medio magneto - eléctrico debía ser un lugar donde se depositara la energía del campo. Dinámicamente el campo era visto como transformaciones energéticas del éter, donde cada cambio en la energía estaba relacionado con un cambio en la fuerza magnética.

"Hablando sobre la energía del campo, de cualquier forma, quiero ser entendido literalmente. Toda la energía es la misma que la energía mecánica, ya sea que exista en la forma de movimiento o en la forma de elasticidad, o en cualquier otra forma. La energía del fenómeno electromagnético es energía mecánica.... En nuestra teoría, esta reside en el campo electromagnético, en el espacio que rodea los cuerpos electrificados y magnéticos, al igual que en los mismos cuerpos, y de dos formas diferentes, las cuales pueden ser descritas.. como polarización magnética y polarización eléctrica, o ... como el movimiento y el estrés de ellos y el mismo medio."⁸¹

De aquí, que el campo interactuara con la materia mediante la transmisión de energía, así como recibiendo energía de ella. El mecanismo por el cual suceden estos intercambios no fue explicado por Maxwell.

A pesar de haber desarrollado el modelo mecánico y el de propagación de la acción electromagnética por separado, para Maxwell era importante conjugar en una teoría tanto el mecanismo de acción, como las leyes, las cuales como hemos dicho, fueron desarrolladas sin tomar en cuenta el mecanismo de acción. Por ello, Maxwell consideraba que su teoría estaba incompleta.

⁸⁰ El término de materia ponderable se utiliza para designar los cuerpos sólidos; es decir aquellos que tuvieran cierto volumen y densidad, capaz de ser apreciado a simple vista.

⁸¹ Nersessian, N., Faraday to Einstein: Constructing Meaning in Scientific Theories, p. 91.

3.7. Los seguidores de Maxwell

A partir del trabajo de Maxwell, la teoría del campo electromagnético se convirtió en un campo de estudio, de forma que no hubo necesidad de pedir prestados resultados de otros campos; tal y como lo hiciera W. Thomson o el propio Maxwell.

Algunos de los experimentos realizados por los seguidores de Maxwell como Hertz y Heaviside estuvieron enfocados en su mayoría a confirmar los experimentos sugeridos por él, es decir, tuvieron el objetivo de corroborar su teoría, de tal forma que el desarrollo de los conceptos de campo quedaron un poco de lado, a diferencia de la atención que tanto Faraday como Maxwell habían puesto en ellos. Pero, por otro lado, los experimentos los llevaron a tener una mejor visión sobre la naturaleza de la corriente y del campo electromagnético. Los principales avances en cuanto a la teoría de la corriente eléctrica estuvieron a cargo de Hall, Boltzmann, Fitzgerald y Joseph John Thomson. Los dos últimos junto con Heaviside se dedicaron principalmente a estudiar los efectos producidos cuando un campo de desplazamiento eléctrico o inducción magnética se movía a través del éter; lo cual era de suma importancia, ya que las fuentes de acciones electromagnéticas eran las cargas en movimiento.

Edwin Hall descubrió el efecto que lleva su nombre: el efecto Hall⁸². Ludwig Boltzmann (1844 – 1906) realizó una aplicación del efecto Hall, al calcular la velocidad de las cargas eléctricas que transportaba la cinta plana, suponiendo que sólo un tipo de electricidad se encuentra en movimiento. Debido a que los resultados obtenidos por Boltzmann resultaron ciertos, la suposición era entonces correcta, sólo un tipo de electricidad forma la corriente eléctrica.

George Fitzgerald (1851 – 1901) y Joseph John Thomson (1856 - 1940), observaron que el movimiento de un cuerpo cargado electrostáticamente correspondía o era equivalente a una corriente eléctrica.

⁸² Hall utilizó una cinta de hoja de oro montada en vidrio, formando parte de un circuito eléctrico a través del cual pasaba una corriente eléctrica. La cinta estaba situada entre los polos de un electroimán de forma perpendicular a las líneas de fuerza magnética. El efecto Hall consiste en la creación de una fuerza electromotriz perpendicular a la fuerza electromotriz original.

Thomson contribuyó a la teoría de la corriente eléctrica, al observar que la conducción en electrolitos y en metales era similar; sólo que en los electrolitos los portadores de corrientes eran provistos por la sal, mientras que en los metales cada molécula era capaz de proveer portadores. De esta forma, propuso ver la **corriente en los metales como una serie de descargas causadas por el acomodamiento de los sistemas moleculares**. Por otro lado, sus estudios sobre la ionización de gases le llevaron a suponer que las cargas vítreas y resinosas tenían distintos papeles en la conducción. Las cargas resinosas eran concebidas como transportadas por los corpúsculos negativos o electrones, y se movían libremente entre los átomos del metal. Las cargas vítreas estaban más o menos sujetas a los átomos. De esta forma, la transportación de electricidad se debía casi totalmente a los electrones o cargas negativas.

Las hipótesis de Joseph John Thomson sobre la conducción eléctrica, se vieron complementadas con las de Lorentz, y otros experimentos realizados en la época, dando como resultado el siguiente modelo:

“Se supone que los átomos del metal están fijos, y que en los intersticios entre ellos un gran número de electrones resinosos se mueven rápidamente. Las colisiones entre los electrones son azarosas, de forma que sus colisiones con los átomos fijos tienen la misma consideración; este movimiento es análogo al de colisiones entre esferas estáticas y en movimiento.”⁸³

De esta forma, para J. J. Thomson, la corriente eléctrica se convertía en un movimiento de electrones, dejando de lado la concepción de fluido que de ella se tenía.

John Henry Poynting (1852 - 1914) y Oliver Heaviside (1850 - 1925) supusieron que la energía era transportada por la corriente misma dentro del cable, a diferencia de la asociación que se hacía antes de la corriente eléctrica con el transporte de energía de un lugar a otro; o en la teoría de Maxwell, donde el almacén y el vehículo de la energía era el medio dieléctrico que rodeaba el cable. Así, en el caso del cable que transporta una corriente eléctrica, las líneas de fuerza magnética son círculos alrededor del eje del cable, mientras que las líneas de la fuerza eléctrica están dirigidas a lo largo del cable; por lo que la energía debe fluir en el medio en una dirección en ángulos rectos al eje del cable. Una corriente debía consistir esencialmente con una convergencia de energía

⁸³ Whittaker, E., A history of the theories of aether and Electricity, p. 421.

eléctrica y magnética del medio alrededor del conductor, y su transformación en otras formas.

Poynting adoptó la visión de Faraday de las líneas de fuerza; por lo que sugirió que si en un cable se hacía correr una corriente eléctrica, aumentando su intensidad desde cero, hasta un cierto valor, las líneas de fuerza debían llegar a su lugar después de moverse desde el interior hacia el exterior del cable. De esta forma el campo magnético aumentaría debido la emisión continua por parte del cable de líneas de fuerza.

Heinrich Hertz (1857 – 1894) realizó dos contribuciones a la teoría de campo. La primera fue la verificación de la propagación de ondas electromagnéticas y la segunda fue una crítica radical a la estructura conceptual de las ecuaciones de campo de Maxwell, lo cual derivó en una reformulación de las ecuaciones por parte de Hertz. Sin embargo, Hertz no abandonó los modelos mecánicos ni las representaciones del campo.

A finales de 1886, Hertz empezó una serie de experimentos que lo llevaron a confirmar la propagación de las ondas electromagnéticas a través del aire.

Después de realizar un análisis de las condiciones que establecía Maxwell en su teoría (existencia de una sustancia llenando el aire y la polarización eléctrica y magnética del medio), Hertz se propuso detectar y medir la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas. La velocidad de propagación resultó ser la velocidad de la luz.

En su artículo de 1884, Hertz formuló las ecuaciones que expresaban la propagación de las fuerzas en términos de relaciones simétricas entre las fuerzas eléctricas y magnéticas. Heaviside también formuló ecuaciones de campo electromagnético basándose en la relación simétrica entre fuerzas eléctricas y magnéticas.

En la introducción a su colección de artículos, Hertz analizó cuidadosamente la acción del campo electromagnético a través del espacio vacío, estableciendo los siguientes puntos de partida:

1. Se supone que un objeto se toma la tarea de excitar continuamente a todos los puntos

que se encuentran a su alrededor, atracciones que son de una magnitud y dirección definida, con los cuales se llena el espacio. Sin embargo, no se registra ningún cambio en el espacio, por lo que las fuerzas a distancia son independientes del medio.

2. En primer lugar, la fuerza es transmitida por la acción a distancia y por la polarización de las pequeñas partes del medio. Estas últimas son las que actúan a distancia, mientras que la polarización es la que depende del medio. En segundo lugar, se tiene el caso en que toda la energía que interviene en el proceso se encuentra en el medio y ninguna parte de la energía se encuentra en las cargas que actúan a distancia. Esto es lo que en realidad, de acuerdo con Hertz, reflejaban las leyes de Maxwell, pero no coincidía con la interpretación física de Maxwell.

Con estas explicaciones sobre la transmisión de las fuerzas, Hertz eliminó de sus ecuaciones la polarización del éter y el desplazamiento eléctrico propuesto por Maxwell en sus ecuaciones, permaneciendo como base de la formulación la simetría entre fuerzas eléctricas y magnéticas. Hertz, consideró un sistema al igual que lo hizo Maxwell en el que "el éter es contenido dentro de los cuerpos ponderables y se mueve con ellos".⁸⁴

3.8. El desarrollo de la teoría de campo en la época de Lorentz

A pesar de que podemos considerar a Lorentz como uno de los seguidores de Maxwell, la introducción de los electrones en su teoría electromagnética, abre una brecha dentro del campo de la Física.

Es en esta época donde los electrones son utilizados para explicar los fenómenos electromagnéticos, y corresponde a la última etapa en la que se considerará la existencia del éter.

⁸⁴ Whittaker, E., A history of the theories of aether and Electricity, p. 329.

3.8.1. Concepto de campo electromagnético

A partir de los descubrimientos de Maxwell, la teoría electromagnética se vio en parte ligada a algunos fenómenos ópticos, los cuales ayudaron a establecer las condiciones del éter. Hay que recordar que el éter había sido hasta finales del siglo XIX parte importante en el desarrollo de la teoría electromagnética, lo cual cambió con Hendrik Antoon Lorentz (1853 – 1928).

De acuerdo con Nersessian⁸⁵, en sus publicaciones, Lorentz no dejó evidencias de la forma en que llegó a ciertas concepciones o las razones por las que adoptó algunas posturas.

El campo que había sido considerado como una sustancia newtoniana por Maxwell, pasó a ser un estado no newtoniano en la teoría de Lorentz; producto de la separación que realizó entre la materia y el éter y la suposición de que un cuerpo en movimiento no puede comunicar su movimiento al éter que lo rodea, o al éter que está en contacto con sus partículas. Dicho éter era solamente un espacio con ciertas propiedades dinámicas.

De acuerdo con Whittaker⁸⁶, la separación del éter y la materia constituye una de las características más relevantes de la teoría de Lorentz.

En su trabajo, realizó una re-aproximación entre los conceptos de acción a distancia y el de acción continua de las acciones electromagnéticas. Los problemas que intentaba resolver con esta aproximación eran:

1. El movimiento o el carácter estático del éter.
2. La naturaleza de la interacción entre el éter y la materia.
3. La naturaleza de la carga.

Lorentz asumió la visión que Helmholtz tenía acerca de la acción a distancia, debido a que la encontraba más inteligible, a diferencia de la teoría de Maxwell, la cual encontraba

⁸⁵ Nersessian, N. (1984). *Faraday to Einstein: Constructing Meaning in Scientific Theories*. Países Bajos: Martinus Nijhoff Publishers.

⁸⁶ Whittaker, W. (1987) *A history of the theories of aether and Electricity*, Estados Unidos: Tomash Publishers.

difícil de comprender. Una de las dificultades que encontraba en la teoría de Maxwell, es que no hacía una separación clara entre el éter y otras sustancias dieléctricas. De esta forma, era un problema concebir el campo electromagnético en ausencia de materia.

Como mencioné anteriormente, Lorentz hizo una separación entre la materia y el éter. Esta separación lo llevó a un claro entendimiento entre el campo y carga. En una de sus publicaciones, dejó expresado que el éter era el único dieléctrico, que penetraba la materia y se encontraba presente entre las moléculas de los cuerpos rígidos y los fluidos, así como en gases. El éter que permeaba todo, tenía las mismas propiedades en el vacío y dentro de la materia y, por tanto, era responsable de los efectos dieléctricos.

A pesar de que Lorentz había cambiado las propiedades del éter, y había establecido algunas de sus características, no se detuvo a explicar la naturaleza de éste, ni la interacción entre partículas.

La teoría de Lorentz, era una teoría de electrones (pequeños osciladores armónicos dentro de las moléculas⁸⁷); es decir, todos los fenómenos electrodinámicos fueron atribuidos a la acción de cargas eléctricas en movimiento; las cuales se suponía que debían experimentar fuerzas proporcionales a sus velocidades, y comunicar dichas fuerzas a la materia a la que estaban asociadas, todo esto al ser expuestas a un campo magnético. De esta forma, Lorentz suponía que la interacción de la materia con el campo eléctrico era efectuada por cargas eléctricas asociadas con los átomos de la materia, y que la propagación de la influencia se llevaba a cabo de un electrón a otro; a diferencia de que, antes se asumía que los electrones eran capaces de actuar entre ellos a distancia, con fuerzas que dependían de la carga, distancia entre ellos y velocidades. En la teoría actual⁸⁸ los átomos no actuaban directamente entre ellos, pero sí mediante el medio en el cual estaban sumergidos. A dicho medio se le asignaba las propiedades del éter de Maxwell.

Con las características anteriores, Lorentz intentaba “reducir todos los casos de acciones

⁸⁷ Lorentz consideraba que había ciertas fuerzas elásticas que ayudaban a los electrones a volver a su posición de equilibrio después de haber sido sujetos a una fuerza eléctrica. Entonces, los electrones podían vibrar alrededor de sus posiciones de equilibrio bajo la influencia de las fuerzas elásticas.

⁸⁸ Esta teoría actual se refiere a la teoría aceptada por la comunidad científica en la época de Lorentz.

electromagnéticas complicadas a un caso simple y fundamental, en el cual el campo contenía sólo éter libre con electrones solitarios dispersados en él.⁸⁹

La teoría de electrones de Lorentz se vio influenciada por la suposición de Weber sobre la naturaleza de la corriente eléctrica; la cual según él consistía de partículas cargadas positiva y negativamente, moviéndose en direcciones contrarias.

El concepto de campo adoptado por Lorentz al principio de su trabajo, era el de un estado del éter, pero un éter que transmitía acción, entre partículas a distancia. De acuerdo con Nersessian⁹⁰, esta visión es difícil de comprender y Lorentz nunca hizo ninguna explicación sobre ella.

Por otro lado, también adoptó la visión de Maxwell y Faraday sobre la acción continua. Al igual que ellos, veía en esta posición la facilidad de explicar las acciones electromagnéticas y explicar la energía del medio, lo cual no era tan fácil desde la posición de acción a distancia; explicando más los fenómenos observados.

Con base en la teoría de iones, la visión de Lorentz sobre el campo y la materia, se vio cambiada. Ahora los cambios en los estados del éter ocurrían solamente por la presencia y movimiento de los iones, y los iones interactuaban entre ellos mediante el cambio en los estados del éter, alterando así la fuerza que actuaría en otros iones en el tiempo siguiente.

Con la fuerza de Lorentz, el éter actuaba sobre los iones, pero no había una acción mecánica de parte de los iones hacia el éter. Estas consideraciones partían de la hipótesis de Lorentz de que el éter era inmóvil.

Como hemos visto, la teoría de Lorentz giraba alrededor de tres problemas. Uno de ellos, era el carácter estático del éter. De aquí que muchas de sus hipótesis se basaran en esta propiedad del éter, a la cual le daba prioridad.

⁸⁹ Whittaker, E. A history of the theories of aether and Electricity, p. 393.

⁹⁰ Nersessian, N., Faraday to Einstein: Constructing Meaning in Scientific Theories, p. 101.

En 1845 , Stokes había supuesto que la tierra acarrea al éter con su movimiento, de esta forma el éter era puesto en movimiento por ella; la velocidad del éter era la misma que la de la tierra y el movimiento del éter no era rotacional. La suposición de Stokes, llevó a Michelson a la realización de su experimento, el cual continuó tiempo después con el apoyo de Morley. Sin embargo, los resultados obtenidos no condujeron a los científicos a abandonar la teoría del éter, antes bien, confirmaron las hipótesis de Stokes, y la retención de la hipótesis de un éter estático⁹¹ por parte de Lorentz.

A pesar de que los resultados del experimento de Albert Michelson (1852-1931) y Edward Morley (1838-1923) fueron considerados como evidencias necesarias para descartar la hipótesis del éter inmóvil, Lorentz no lo tomó así, antes bien, lo tomó como la demostración de una relación entre las dimensiones de la materia en movimiento y el éter.

“El experimento de Michelson y Morley me ha intrigado por mucho tiempo, y al final he sido capaz de pensar en una forma de reconciliar este resultado con la teoría de Fresnel⁹². Consiste en la suposición de que la línea que une dos puntos de un cuerpo sólido, al principio paralelo a la dirección de la tierra, no guarda la misma longitud cuando es girado subsecuentemente 90°... Qué determina el tamaño y la forma de un cuerpo sólido? Evidentemente la intensidad de las fuerzas moleculares... Ahora podemos afirmar que las fuerzas eléctricas y magnéticas actúan por medio del éter. No es muy lejano suponer que sea igual para las fuerzas moleculares... ... la pregunta continúa porqué el movimiento de la tierra puede hacer más pequeñas las dimensiones en una dirección, como hemos asumido...”⁹³

En lugar de rechazar la existencia del éter, Lorentz explicó que el resultado de Michelson y Morley, indicaba que uno de los brazos del dispositivo se contraía en cierto factor. Las contracciones de la materia quedaban explicadas con las alteraciones de las fuerzas moleculares debido al movimiento del sistema.

El concepto de campo de Lorentz no había cambiado, seguía siendo un estado del éter no-newtoniano y no del espacio. El éter era una entidad aparte de la materia, la cual se encargaba de soportar las acciones electromagnéticas.

A pesar de que Lorentz había hecho una separación entre el éter y la materia, y había modificado el concepto de campo poseído por Maxwell, no era este el concepto “moderno” de campo, el cual fue propuesto por Einstein.

⁹¹ El éter era estático en todo lugar.

⁹² Fresnel suponía que el exceso de éter en la materia en movimiento es acarreado con ella.

⁹³ Nersessian, N., *Faraday to Einstein: Constructing Meaning in Scientific Theories*, p. 108.

Aunque el trabajo de Einstein fue estudiado por Lorentz, éste último no logró convencerse de él:

“Sus resultados (los de Einstein) en cuanto a los fenómenos electromagnéticos y ópticos... concuerdan en lo principal con los que he obtenido en las páginas anteriores, la principal diferencia es que Einstein sólo postula lo que ha deducido, con algo de dificultad y no satisfactoriamente del todo, de las ecuaciones del campo electromagnético..

Aun, pienso, que algo puede ser puesto a favor de la forma en que he representado la teoría. No puedo dejar de lado el éter, el cual puede ser el asiento del campo electromagnético con su energía y sus vibraciones, como atribuyéndole un cierto grado de substancialidad, de cualquier forma debe ser diferente de la materia ordinaria...”⁹⁴

En sus últimos artículos, Lorentz recalcó la existencia del éter como base fundamental de su teoría.

3.8.2. Concepto de corriente eléctrica

La teoría de Lorentz era esencialmente de electrones (pequeños osciladores armónicos dentro de las moléculas); así, todos los fenómenos electrodinámicos fueron atribuidos a la acción de cargas eléctricas en movimiento.

De acuerdo con Lorentz, el concepto del electrón fue introducido debido a la necesidad de entender la relación entre las propiedades eléctricas y magnéticas, y la temperatura, densidad, constitución química o el estado cristalino de las sustancias, así como los fenómenos ópticos.

Por lo tanto, el concepto de electrón, era el de una partícula extremadamente pequeña, cargada con electricidad, presente en cantidades enormes en todos los cuerpos, y cuyo movimiento y distribución explicaban los fenómenos ópticos y eléctricos.

Los electrones debían estar en un estado libre dentro de los conductores, de forma tal que pudieran obedecer las fuerzas eléctricas mediante las cuales las partículas positivas eran conducidas en una dirección opuesta a la que eran conducidas las partículas

⁹⁴ Nersessian, N., Faraday to Einstein: Constructing Meaning in Scientific Theories, p. 114.

negativas. En caso de un cuerpo no conductor, se debía asumir, que los electrones estaban atados a ciertas posiciones de equilibrio. Si en un cable metálico, los electrones negativos estaban viajando en una dirección, y los otros electrones (los positivos), en la dirección opuesta, entonces se tendría una corriente de conducción.

En un dieléctrico, también podía haber un movimiento de electrones. Sin embargo, como corresponde a un cuerpo no conductor, los electrones tendrían una posición definida de equilibrio, pero no serían del todo inmóviles. Podrían ser desplazados por una fuerza eléctrica ejercida por el éter.⁹⁵ Este desplazamiento correspondería a lo que Maxwell llamó corriente de desplazamiento.

A pesar de que la teoría de electrones había tenido éxito, en cuanto a la explicación de los fenómenos eléctricos, Lorentz consideraba que aun faltaban algunas cuestiones que resolver. Es importante mencionar que al igual que se hizo en los tiempos anteriores a Lorentz, la analogía entre la conducción térmica y la eléctrica fue utilizada para explicar el grado de conductividad de los metales.

La conductividad en los metales es explicada por Lorentz en el siguiente párrafo:

"Se supone que cada metal contiene un gran número de electrones libres,... los electrones no son libres de moverse a largas distancias de sus posiciones originales. Están imposibilitados de hacer ello por los impactos en contra de los átomos del metal mismo. Por simplicidad, asumimos sólo un tipo de electrones libres, suponemos que el otro tipo está fijo a la materia. Ahora, si el metal no es sujeto a una fuerza eléctrica, las partículas se mueven indiscriminadamente hacia todos lados; no hay transferencia de electricidad en una dirección definida. Esto cambia tan pronto como la fuerza eléctrica es aplicada. Las velocidad de los electrones hacia un lado incrementan, aquellas hacia el lado contrario disminuyen, de manera que se forma una corriente eléctrica."⁹⁶

Lorentz no dejó de lado la teoría del éter. Antes bien, lo incluyó en su teoría de electrones. Estableció que el éter no sólo permeaba el espacio entre las moléculas, pero también el espacio existente en el interior de los átomos y electrones.

⁹⁵ Hay que recordar que el éter podía ser el asiento del campo electromagnético.

⁹⁶ Lorentz, H. , The theory of electrons and it's applications to the phenomena and radiant heat, p.63.

3.9. Herramientas, modelos de campo y corriente utilizados en el siglo XIX.

Muchos fueron los científicos que contribuyeron a la teoría electromagnética durante el siglo XIX, así como también lo fueron los experimentos planteados, los modelos y analogías utilizadas. Debido a ello, en este apartado, se hará un recuento de los principales elementos de los que echaron mano los científicos, para desarrollar la teoría electromagnética durante estos años.

3.9.1. Campo eléctrico

Esta etapa es la más larga en el desarrollo del concepto de campo. En ella, existen varios elementos importantes utilizados por los científicos: las analogías y los modelos.

W. Thomson utilizó analogías entre el calor y la electrostática, y entre la luz y las vibraciones de un medio elástico. Sin embargo, es importante resaltar el énfasis que dieron los científicos en que estas analogías no debían tomarse al pie de la letra.

La representación principal de campo sostenida por los científicos de la época fue la del **campo como un estado del éter**. De esta forma, fue el éter, el elemento central de las teorías de campo desarrolladas durante la época. El éter sufrió algunas transformaciones, sobre todo como se vió a lo largo de este capítulo, al pasar de la teoría de Maxwell a la de Lorentz.

Por lo que respecta a Faraday, él utilizó las líneas de fuerza como un elemento para explicar la transmisión de las fuerzas. Por esta razón, la visión que representa la posición de Faraday es aquella en la que las líneas de fuerza son el medio de transporte de la fuerza electromagnética; y que por supuesto va en contra de la acción a distancia. Esta visión de las líneas de fuerza como transporte de la fuerza electromagnética, sigue estando presente en los estudiantes universitarios, tal y como se verá en los capítulos 5 y 6.

Por otro lado, la teoría de Faraday introdujo dos representaciones de campo, las cuales mencioné anteriormente:

1. Las fuerzas electromagnéticas son mediadas por las partículas de un medio.
2. El campo con líneas de fuerza como su elemento principal.

Nersessian menciona que “las analogías proveen solamente una solución parcial a los problemas, y cualquier analogía debe ser modificada con el propósito de que se adapte al problema específico en cuestión y completar la solución.”⁹⁷ El mismo Maxwell, expresó la necesidad de utilizar analogías, pero dejarlas de lado para llegar a la teoría final. Por esta razón las llamaba “teorías temporales”, porque su uso era provisional en cuando se llegara a una “teoría final verdadera”. De acuerdo con lo anterior, podía haber varias teorías temporales, de forma que se tendrían muchas formas de mirar un mismo problema.

Maxwell no continuó con los modelos de campo que Faraday había propuesto; antes bien, le dio un nuevo carácter a las líneas de fuerza y confirió al campo otras características.

Una de las características que Faraday había considerado, pero que no logró demostrar, fue el tiempo que tarda en propagarse el campo. Este retardo llevó a Maxwell a creer que algún proceso físico debía estarse llevando a cabo en el espacio dentro del cual se transmitían las acciones electromagnéticas.

Por lo tanto, el concepto que Maxwell poseía del campo era el de un estado del éter, cuya naturaleza era diferente a la de la materia.

Con Maxwell, las líneas de fuerza dejan su carácter de caminos o portadoras de la fuerza magnética; aunque seguían representado un estado del medio en el cual se propagaba un campo electromagnético. Con la postulación del éter como parte esencial de su teoría, mostraba su oposición al concepto de acción a distancia, porque de acuerdo con el, “no es más filosófico admitir la existencia de un medio que no podemos percibir, que

⁹⁷ Nersessian, N., Faraday to Einstein: Constructing Meaning in Scientific Theories, p .74.

afirmar que un cuerpo puede actuar en un lugar en donde no se encuentra.⁹⁸

Cabe destacar que en las ecuaciones de Maxwell:

“el campo “aquí” y “ahora” depende del campo inmediatamente vecino existente un instante anterior. Las ecuaciones permiten predecir lo que pasará un poco más allá de un cierto lugar en el espacio, un instante después, si conocemos lo que pasa “ahora” y “aquí”. Esas ecuaciones permiten ampliar nuestro conocimiento del campo paso a paso, relacionando así por un gran número de pequeños pasos, fenómenos distantes ocurridos en tiempos distintos.”⁹⁹

Lorentz partió de las teorías anteriores, en especial tomó en cuenta algunos de los elementos de Helmholtz, ya que como hemos visto, la teoría de Maxwell le parecía poco comprensible.

El éter que se había manejado, cambió totalmente; dejó de ser un éter mecánico para convertirse en uno no-newtoniano, por lo cual la naturaleza del campo sufrió cambios. Esto se debe a que Maxwell había ligado completamente el éter, el campo y la materia, mientras que Lorentz separó estas entidades. El éter era una entidad aparte de la materia, y se encargaba de soportar las acciones electromagnéticas.

A pesar de los resultados experimentales que evidenciaban la no existencia del éter, Lorentz se aferró a él, debido a que suponía que éste tenían una relación con el tamaño y masa de los cuerpos en movimiento, por otro lado la explicación de su teoría sin éter traería grandes dificultades conceptuales.¹⁰⁰

Con su teoría electrónica, Lorentz abre paso a la teoría de la relatividad y a un nuevo concepto de campo desarrollado por Einstein, del que hablaré en el siguiente capítulo.

Junto con el concepto de campo, se desarrollaron las formas de acción; es decir, las formas en las cuales se transmitía el campo. De acuerdo con Barbara Gusti Doran¹⁰¹, las dos formas de acción que prevalecieron durante el siglo XIX, son:

1. La transmisión con el movimiento de las partículas de electricidad.
2. La transmisión con cambios en el estado físico del éter.

⁹⁸ Cushing, J. Philosophical concepts in Physics. The historical relation between Philosophy and Scientific Theories, p.193.

⁹⁹ Einstein, A. & Infeld, L., La física, aventura del pensamiento, p. 130.

¹⁰⁰ Nersessian, J., Faraday to Einstein: Constructing Meaning in Scientific Theories, p. 117.

¹⁰¹ Gusti, B., Field Theory in 19th-century Britain, p. 222.

Estas formas de acción son notorias dentro de los modelos antes descritos. En primer lugar, el modelo establecido por Faraday, nos lleva a la forma de acción por medio de la transmisión con el movimiento de las partículas de electricidad. En cambio, el modelo establecido por Maxwell, nos lleva a la transmisión con cambios en el estado físico del éter.

Es importante hacer notar que cada científico de los que hablé tenía su visión sobre el campo eléctrico, aunque compartían algunos elementos de la teoría electromagnética, diferían en varios aspectos. Esto refleja la complejidad del concepto de campo eléctrico, así como de la teoría electromagnética.

3.9.2. Corriente eléctrica

Durante el siglo XIX, se utilizaron varios modelos de corriente eléctrica. Sin embargo estos modelos se pueden agrupar en tres:

1. Modelos que expresan la corriente eléctrica como un fluido.
2. Modelos que tratan de explicar la corriente eléctrica con base en la existencia de moléculas y electrones.
3. Modelos que explican la corriente como una perturbación del medio.

Los modelos que constituyen el primer grupo toma como base aquellos que se venían gestando un par de siglos atrás, y dentro de este grupo podemos ubicar a Faraday, Oersted y Maxwell, entre otros. Un ejemplo, es la consideración de la corriente como dos fluidos moviéndose en direcciones opuestas.

El segundo grupo de modelos, se desarrolló a partir de la teoría electrónica, de la cual Lorentz es el principal exponente. Este grupo está también formado por varios modelos. Un ejemplo de es el utilizado por J. J. Thomson, el cual poseía un concepto de corriente como una serie de descargas intermitentes causadas por el reacomodo de los sistemas. Es de destacarse la concepción que poseía Thomson ya que es de los primeros que

considera a la corriente eléctrica como el movimiento de electrones.

Dentro de este grupo también podemos ubicar a Helmholtz. Para él las cargas eléctricas eran “la acumulación de algo con la misma identidad que la materia misma, y la corriente eléctrica era el flujo de cargas eléctricas.”¹⁰² De aquí, podemos observar que Helmholtz tomó en cuenta tanto la existencia de electrones como la visión de la corriente como fluido, lo cual no era contradictorio para él.

Científicos como Wilhelm Weber y Gustav Fechner, también son representantes de esta visión.

La concepción de la corriente como un disturbio del medio, fue descrita detalladamente por Oersted: él consideraba que la electricidad consistía en un disturbio incesante, seguido por la restauración del equilibrio. Esta visión es comparada con la propagación ondulatoria, la cual implica la propagación de una perturbación a través de un medio.

Cabe mencionar que a principios del siglo XIX, “la luz en el espacio vacío fue explicada como un fenómeno ondulatorio del éter ...” Ya que la luz fue identificada como un campo electromagnético, tanto el campo como la corriente fueron identificados como un fenómeno ondulatorio.

Es importante hacer énfasis en la concepción sostenida por Helmholtz, debido a que en ella se fusionan dos elementos. Por un lado, la corriente como fluido, desarrollada desde el siglo XVII y por otro lado el elemento nuevo, apenas descubierto: los electrones.

¹⁰² Buchwald, J., The Michelson experiment in the light of electromagnetic theory before 1900, p.62.

3.10. La Física Moderna y el desarrollo de los conceptos de campo y corriente

A finales del siglo XIX los conceptos de campo electromagnético y corriente eléctrica sufren algunos cambios debido al descubrimiento del electrón. Esto se puede apreciar claramente en el modelo de corriente eléctrica, la cual, deja de ser un fluido para consolidarse como un movimiento de electrones.

Una de las teorías desarrolladas en el siglo XX que logra cambiar notablemente el concepto de campo electromagnético, es la teoría de la relatividad. Esta fue formulada por Einstein, y junto con otros experimentos abrieron una nueva brecha en la investigación de los fenómenos electromagnéticos. Estos experimentos, están relacionados con el desarrollo de la Mecánica Cuántica, y, además de contribuir a la interpretación de algunos fenómenos electromagnéticos, influenciaron parte del trabajo de Einstein.

3.10.1. Einstein

De acuerdo con *Albert Einstein* (1879 – 1955), la concepción del campo electromagnético como entidad había sido aceptada –hacia fines del siglo XIX- y los científicos se habían dado a la tarea de dar una explicación mecánica a las ecuaciones de Maxwell. Sin embargo, esta tarea no resultó del todo exitosa como vimos en el capítulo anterior, debido a que pronto se abandonó, y no se desarrollaron más modelos mecánicos de la propagación del campo.

En una carta escrita alrededor de 1895, Einstein describe los estudios a realizar durante ese tiempo. Dentro de estos estudios se encontraba la determinación del campo magnético por una corriente eléctrica, mediante la medición de la deformación elástica del éter. Se puede observar que durante los primeros años de sus estudios, Einstein todavía creía en la existencia del éter. De acuerdo con Nersessian, la última evidencia que se

tiene de su creencia en el éter, es una carta escrita a un amigo en 1901, en la cual le expresaba que tenía “un método simple y nuevo para investigar el movimiento de la materia relativo al luz-éter.”¹⁰³

El proceso que llevó a Einstein a la eliminación del éter del concepto de campo, fue un proceso crítico acerca de los fundamentos que dieron origen a la existencia del éter.

El trabajo de Planck sobre la radiación de cuerpo negro -la cuantización de la energía de radiación-, fue reconocido ampliamente por Einstein y lo llevó a la publicación de dos artículos: el primero sobre el efecto fotoeléctrico y el segundo sobre el movimiento browniano.

Einstein logró darse cuenta de varios fenómenos físicos que lo ayudaron a complementar su visión de la Física. Uno de ellos, fue que tanto la mecánica como la electrodinámica eran inadecuadas en regiones demasiado pequeñas para tomar en cuenta las fluctuaciones.

“La contradicción con la dinámica era fundamental; mientras que la contradicción con la electrodinámica podía ser menos fundamental. Esto es, si la radiación posee energía discreta, está en contradicción con la mecánica. Si posee estructura atómica, está en contradicción con la mecánica y con el electromagnetismo.”¹⁰⁴

Estos resultados eran de gran importancia para Einstein debido a la visión que poseía de la Física como una disciplina unificada; a diferencia de los demás científicos de la época, quienes interpretaban los resultados desde el punto de vista del área que les ocupaba.

La imposibilidad de explicar los fenómenos nuevos con las teorías existentes, llevó a Einstein a la búsqueda de un principio universal el cual pudiera dar resultados exactos en la explicación de dichos fenómenos. El **primer resultado** de su búsqueda lo constituye el siguiente postulado:

“Para cada sistema de referencia en el que las leyes de la mecánica sean válidas, las leyes de la electrodinámica y óptica son también válidas.”¹⁰⁵

Con este primer postulado, Einstein elimina la necesidad del éter como sistema de

¹⁰³ Nersessian, N., Faraday to Einstein: Constructing Meaning in Scientific Theories, p. 123.

¹⁰⁴ Ibidem, p. 125.

¹⁰⁵ Ibidem, p. 126.

referencia preferencial para la formulación de las leyes electromagnéticas. El **segundo postulado** queda enunciado en las siguientes líneas:

“La luz siempre se propaga en el espacio vacío con una velocidad definida c , la cual es independiente del estado de movimiento del cuerpo que la emite.”¹⁰⁶

El postulado anterior deja aclarado que el éter no era el único medio en el que la velocidad de la luz es c .

Los dos postulados anteriores, hacen que el éter se vuelva superfluo para la teoría electromagnética. Esto es, ya no hay necesidad de él, puesto que no constituye un marco de referencia preferencial para las acciones electromagnéticas.

“Estos dos postulados son suficientes para obtener una teoría simple y consistente de la electrodinámica de cuerpos en movimiento tomada como una base de la teoría de cuerpos en reposo de Maxwell. Será probado que la introducción del “éter luminífero” es superfluo porque la visión que será desarrollada no introducirá ni un “espacio en absoluto reposo” provisto con propiedades especiales, ni asociará un vector-velocidad con un punto del espacio vacío en el cual los procesos electromagnéticos ocurren.”¹⁰⁷

Aunque al principio el éter no era primordial para la física, en el siglo XIX encontró buen soporte al considerarse a la luz como un proceso vibratorio en un medio elástico, inerte, que llenaba todo el espacio, y un sustento del campo electromagnético.

Por otro lado, Einstein reconocía que el éter había sido sólo un elemento que había ayudado a los científicos del siglo XIX a comprender las acciones electromagnéticas, y, que debido a su forma de pensamiento fue una herramienta necesaria para el desarrollo de sus teorías y concepciones.

“En razón de que a los físicos del siglo XIX les hubiera resultado por completo absurdo atribuir funciones o estados físicos al espacio mismo, se inventó un medio que ocupaba todo el espacio, según el modelo de la materia ponderable: el éter, al que se consideraba como un vehículo de los fenómenos electromagnéticos y, por ende, también de los fenómenos luminosos. Los estados de este medio, que se suponían ser los de los campos electromagnéticos, en un primer momento fueron concebidos desde un punto de vista mecánico, sobre la base del modelo de las deformaciones elásticas de los cuerpos sólidos....El cuadro general era el que sigue: el espacio está invadido por el éter; en éste flotan los corpúsculos materiales o átomos de la materia ponderable, cuya estructura atómica había sido firmemente establecida a finales de siglo... El éter era sólo el asiento de todas las fuerzas que actúan en el espacio...”¹⁰⁸

¹⁰⁶ Nersessian, N., Faraday to Einstein: Constructing Meaning in Scientific Theories, p. 126.

¹⁰⁷ Idem.

¹⁰⁸ Einstein, A., Mis ideas y opiniones, p. 252.

Además de que el éter había ayudado a desarrollar las teorías, Einstein consideraba que era un resultado de la conexión entre causa y efecto en las experiencias, como si no hubiera otra causa de las acciones mutuas más que el contacto inmediato. Esta consideración se basaba en que a pesar de que la ley de Newton de la gravitación ya había establecido lo que se consideraba como una acción a distancia, tal vez sólo escondía lo que en verdad era una acción transferida a través del medio por medio de los movimientos o deformaciones elásticas de él. Lo anterior y la búsqueda de una visión unificada sobre la naturaleza de las fuerzas, habían llevado a la creación del éter.

De acuerdo con Nersessian, quitar el éter de la descripción de las acciones electromagnéticas, marcó un cambio profundo en el concepto de campo.¹⁰⁹

La eliminación del éter de la teoría de campo ayudó a transformar el concepto de espacio; el cual había pasado de ser un "receptáculo pasivo de todos los fenómenos"¹¹⁰, a un espacio en el que se propagaban ondas y campos, capaces de ejercer fuerzas sobre masas eléctricas.

Es importante mencionar, que dentro de la teoría de la relatividad desarrollada por Einstein, los conceptos de simultaneidad y de tiempo son analizados detalladamente. A partir de este análisis Einstein deja de lado el concepto de éter como marco de referencia privilegiado y sustentador del campo electromagnético.

Ya que ninguna acción puede ser propagada con una velocidad mayor que la de la luz, de acuerdo con el segundo postulado, la energía y el momento de las acciones electromagnéticas debían estar en el campo mientras se transmitía la acción; lo cual convertía al campo electromagnético en el lugar donde se lleva a cabo un proceso muy complejo. De acuerdo con Einstein, la interpretación Maxwell-Faraday sobre la acción a distancia electromagnética volvió convincente el hecho de que no había tal acción a distancia (sin involucrar un medio intermediario); pero, la teoría de la relatividad establece que la acción a distancia tiene lugar a la velocidad de la luz, en lugar de una acción a distancia instantánea con una velocidad de transmisión infinita.

¹⁰⁹ Nersessian, N., *Faraday to Einstein: Constructing Meaning in Scientific Theories*, p. 133.

¹¹⁰ Einstein, A., *Mis ideas y opiniones*, p. 251.

El que Einstein atribuyera al campo propiedades de momento y energía, era necesario para la conservación de la energía y momento. Así, con la atribución de estas propiedades, la naturaleza del campo se volvía equivalente a la de la materia, en el sentido que posee energía y momento; y resulta ser una identidad independiente.

“En la teoría especial, el campo no es sólo indispensable para la descripción de las acciones electromagnéticas, como con Maxwell y Lorentz, pero también es un elemento irreducible de descripción, en el mismo sentido que el concepto de materia en la mecánica newtoniana. Es independiente de la materia y es libre de interactuar con ella. El campo electromagnético interactúa con la materia recibiendo de ella energía y momento y transfiriendo estas cantidades a ella.”¹¹¹

Debido a que el campo se encontraba ontológicamente a la par que la materia, era necesario atribuirle propiedades como la energía y momento.

Además del concepto de campo, las ondas electromagnéticas habían aportado elementos nuevos a la teoría. Einstein e Infeld, consideran que las ondas electromagnéticas propagan variaciones del campo electromagnético; así, toda variación de este último, origina un campo eléctrico. Como el campo representa energía, de acuerdo con lo mencionado anteriormente, las variaciones al propagarse en el espacio con una velocidad determinada, producen una onda transversal. Estas ondas transversales también se propagaban en el vacío, y lo hacían con la velocidad de la luz. Hay que mencionar, que Einstein no hace referencia a la forma en la que las ondas electromagnéticas lograban propagarse en el vacío.

Nersessian¹¹² establece que el último punto en la evolución del concepto de campo, es la visión de Einstein.

¹¹¹ Nersessian, N., *Faraday to Einstein: Constructing Meaning in Scientific Theories*, p. 134.

¹¹² Idem.

3.10.2. La corriente eléctrica y la teoría de electrones

Al utilizar el término “fluido” para designar a la corriente, se le había conferido un carácter de continuidad¹¹³. Sin embargo, con el descubrimiento y la introducción del electrón dentro de la teoría de campos eléctricos y magnéticos; la corriente eléctrica dejaba de ser un fluido eléctrico para transformarse en una concepción que iba de acuerdo con los descubrimientos realizados hasta el momento.

Einstein e Infeld lo dejan plasmado en el siguiente párrafo:

“Pero una corriente, desde el punto de vista de la teoría de campo, significa la existencia de un campo eléctrico que fuerza el desplazamiento de la electricidad a través del conductor. La corriente -y por lo tanto, también el campo eléctrico- desaparece cuando el imán vuelve al estado de reposo.

Imaginemos, por un momento, no tener la noción de campo y tratemos de describir cualitativa y cuantitativamente los resultados del experimento de Faraday con los conceptos mecánicos anteriores a la introducción de aquél. Dicho experimento demuestra que: por el movimiento de un dipolo magnético se crea una nueva fuerza que hace desplazar en el conductor los fluidos eléctricos.”¹¹⁴

De esta forma, queda expresado el cambio que se había generado en el concepto de corriente, desde los tiempos de Faraday hasta los de Einstein. Hay que mencionar que este concepto de corriente (electrones desplazados por una fuerza eléctrica), ya había sido considerado por Lorentz. Sin embargo, Einstein deja de lado el éter, lo cual marca la principal diferencia entre los conceptos de corriente sostenidos por ambos científicos.

Gracias al descubrimiento del electrón, el fluido eléctrico ya no era continuo, como lo mencioné anteriormente, ahora era un “fluido eléctrico negativo con estructura granular, exactamente como una playa se compone de granos de arena y una casa está constituida de ladrillos.”¹¹⁵

¹¹³ Con la continuidad de la corriente, Einstein e Infeld se refieren a que el valor de la carga podía variar en cantidades o pasos arbitrariamente pequeños.

¹¹⁴ Einstein, A. & Infeld, L., La física, aventura del pensamiento, p. 123.

¹¹⁵ Ibidem, p. 217.

3.11. Modelos de campo y corriente eléctrica utilizados en los siglos XVI - XX.

Síntesis

En este capítulo y los dos anteriores, ha quedado plasmado el proceso mediante el cual los científicos dieron forma a los conceptos de campo y corriente eléctrica; así como las concepciones de dichos conceptos que cada uno sostuvo. A continuación se presenta una tabla que sintetiza las visiones de los científicos, así como el proceso de formación de la teoría electromagnética.

Campo eléctrico y magnético

Tabla 1. Principales concepciones de campo eléctrico y magnético en los siglos XVI - XX.

William Gilbert (1544 - 1603)	<ul style="list-style-type: none">- La atracción entre dos objetos se debe a que un aliento que procede de un cuerpo que es una mezcla de humedad o un fluido (efluvia), alcanza el cuerpo que va a ser atraído y tan pronto es alcanzado se une al eléctrico atrayente.- El campo magnético es una esfera de virtud que se extiende en todas direcciones alrededor de un imán, en un espacio limitado.
Jean Nollet (1700 - 1770)	<ul style="list-style-type: none">- Existe un fluido sutil y flamable presente en todos los cuerpos y en todas circunstancias.- Cuando un objeto es frotado, parte del fluido se escapa de sus poros formando un vapor efluente por lo que tiene que ser reparado por un vapor afluyente que entra al cuerpo.
Michael Faraday (1791 - 1867)	<ul style="list-style-type: none">- Las líneas de fuerza son una representación de la transmisión de una fuerza constante por medio de las partículas contiguas.- Las fuerzas electromagnéticas son transmitidas por las partículas del medio.- Las fuerzas eléctricas son afectadas por el material existente en el espacio en el que se transmiten.- Las fuerzas se propagan por medio de las vibraciones de las líneas de fuerza o éter.
William Thomson (1824 - 1907)	<ul style="list-style-type: none">- Las líneas de fuerza son una representación de la transmisión de una fuerza constante por medio de las partículas contiguas.- El éter es un fluido continuo que permea el espacio entre las moléculas de los cuerpos.

James Maxwell (1831 - 1879)	<ul style="list-style-type: none"> - En el espacio del campo hay materia en movimiento. - Existe un tiempo de retraso en la transmisión de acciones eléctricas y magnéticas. - La energía del campo debe residir en algún medio mientras se lleva a cabo la propagación. - La materia, al moverse, acarrea al éter con ella. - El campo es visto como las transformaciones energéticas del éter. - El campo sólo existe en conexión con sustancias materiales. - El campo interactúa con la materia, mediante la transmisión de energía, así como recibiendo energía de ella.
Hendrik Lorentz (1853 - 1928)	<ul style="list-style-type: none"> - El éter es independiente de la materia, pero la penetra. - El éter es inmóvil. - El campo interactúa con la materia por medio de los electrones. - El campo es un estado del éter. Un éter que transmite la acción entre partículas a distancia.
Albert Einstein (1879 - 1955)	<ul style="list-style-type: none"> -El éter es un elemento superfluo para la teoría electromagnética, ya que no hay marcos de referencia privilegiados. - El campo tiene momento y energía.

Es importante hacer énfasis en algunos de los aspectos presentados en la tabla 1:

- Tanto Nollet como Gilbert coincidían en que la atracción eléctrica se debía a un fluido liberado por el cuerpo que había sido frotado. Dicho fluido, se quedaba rodeando el cuerpo mientras que se llevaba a cabo la atracción.
- La electricidad considerada como un fluido, empezó con la consideración de la efluvia, y permanecería en la teoría eléctrica hasta finales del siglo XIX y principios del XX.

Los dos puntos anteriores, muestran los elementos que constituían el conocimiento eléctrico desarrollado hasta ese momento (s. XVIII). El campo eléctrico estaba fuertemente ligado a la materia (efluvia), que era la encargada de unir los cuerpos. En la época de Faraday el éter toma el papel de la efluvia, y es el que se encargará de transmitir las fuerzas electromagnéticas:

- Hacia la época de Faraday, el campo se concebía como una estructura de líneas de fuerza, las cuales se encargaban de transmitir las fuerzas electromagnéticas. Debido a la importancia del medio, Faraday identificó las vibraciones de las líneas de fuerza como el éter. Fue gracias a la teoría desarrollada por Faraday, que el

éter tomó un papel fundamental en el desarrollo de la teoría electromagnética. De esta forma, ya no era posible concebir un campo sin la presencia de un éter, un medio que se encargara de propagar las fuerzas.

- Faraday, Thomson y Maxwell, compartían la visión de un éter necesario para la transmisión de las acciones electromagnéticas.

Los tres científicos: Maxwell, Thomson y Faraday, son representantes de una época en la cual aunque son mayores los descubrimientos y experimentos que les permiten ampliar la teoría del campo eléctrico y magnético; estos mismos experimentos y descubrimientos les empiezan a dificultar la interpretación de sus observaciones, en especial la forma en que se propaga el campo. La existencia del éter es un elemento incompatible con la teoría de la relatividad de Einstein:

- Aunque Lorentz separa el éter de la materia y los reconoce como entidades independientes, sigue ligando el campo al éter, considerándolo como un estado de éste.
- Los electrones adquieren un lugar dentro de la teoría electromagnética.

A pesar de que Lorentz comparte con Faraday, Thomson y Maxwell la existencia de un éter, no lo considero con el grupo anterior; debido a que gracias a las suposiciones de Lorentz y a la relatividad, la teoría electromagnética sufre varios cambios que provocan la eliminación del éter:

- Con el establecimiento de Einstein acerca de que no hay marcos de referencia privilegiados, el éter queda como un elemento superfluo en la teoría electromagnética. Rompiendo con ello, la visión que había dominado un siglo, y que es la necesidad de que las partículas de algún medio transmitan las fuerzas electromagnéticas.
- La identificación del campo como una entidad independiente y ontológicamente igual a la materia, en el sentido que posee energía y momento, cambia por completo tanto la visión que hasta entonces se tenía del campo electromagnético, como el tratamiento que se hacía de él. Esto es, Einstein ya no se preocupa más por crear un modelo a través del cual pueda describir la propagación del campo eléctrico, sino que asume un espacio en el que se propagan ondas y campos.

Corriente Eléctrica

Tabla 2. Principales concepciones de corriente eléctrica en los siglos XVII - XX.

Stephen Gray (1666 - 1736)	La efluvia es un fluido eléctrico capaz de ser transferido de un cuerpo a otro.
Charles Dufay (1698 - 1739)	Hay dos tipos de electricidades: vítrea y resinosa.
Jean Nollet (1700 - 1770)	El fenómeno eléctrico se debe al movimiento en direcciones opuestas de dos corrientes de un fluido muy sutil y flamable presente en todos los cuerpos.
William Watson (1715 - 1787)	El fluido eléctrico es similar al calor: se crea por fricción y se transfiere por contacto.
Benjamín Franklin (1706 - 1790)	La corriente es un fluido constituido de partículas extremadamente sutiles y que puede permear la materia común, y sus partes se repelen mutuamente.
Luigi Galvani (1737 - 1789)	La electricidad es un fluido que poseen todos los cuerpos.
Hans Oersted (1777 - 1851)	La corriente es un disturbio incesante y una restauración del equilibrio. Esto incluye una actividad abundante por lo que no puede decirse que la corriente sea uniforme. Es entonces un conflicto eléctrico, que tiene lugar en el medio en el que se propaga la electricidad.
André Ampère (1775 - 1836)	En el fluido intermolecular, las electricidades opuestas están continuamente siendo disociadas y recombinadas; una disociación del fluido dentro de un intervalo intermolecular que haya tenido lugar, la electricidad positiva producida se une a la electricidad negativa del siguiente intervalo en la dirección de la corriente, mientras que la electricidad negativa del primer intervalo se une con la electricidad positiva del siguiente intervalo en dirección contraria. Estos cambios constituyen la corriente eléctrica.
Gustav Fechner (1806 - 1887)	Una corriente siempre fluye a través de los conductores en pares: una corriente de electricidad positiva en una dirección, y una corriente igual de electricidad negativa con la misma velocidad en dirección opuesta.
Michael Faraday (1790 - 1867)	La corriente es algo progresivo, ya sea un fluido o electricidad, o dos fluidos moviéndose en direcciones opuestas, o vibraciones, o de manera más general, fuerzas progresivas. Un arreglo progresivo es un ajuste local de las partículas, o fluidos o fuerzas.
James Maxwell (1831 - 1879)	<ul style="list-style-type: none"> - Las electricidades son fluidos porque son capaces de ser transferidos de un cuerpo a otro, y son, dentro de los cuerpos conductores extremadamente móviles. - La electricidad está compuesta por partículas.

Joseph John Thomson (1856 - 1940)	<ul style="list-style-type: none"> - La conducción en electrolitos y en metales es similar; sólo que los portadores de corriente en los electrolitos son aportados por la sal. - La corriente en los metales es como una serie de descargas causadas por el reacomodamiento de los sistemas moleculares. - Los átomos del metal están fijos, y que en los intersticios los electrones se mueven rápidamente. Las colisiones entre los electrones son azarosas, de forma que sus colisiones con los átomos fijos tienen la misma consideración.
John Poynting (1852 - 1914) y Oliver Heaviside (1850 - 1952)	<ul style="list-style-type: none"> - La energía es transportada por la corriente misma dentro del cable. - Una corriente debe consistir esencialmente de una convergencia de energía eléctrica y magnética del medio alrededor del conductor y su transformación en otras formas.
Hendrik Lorentz (1853 - 1928)	Cada metal contiene un gran número de electrones libres. Sin embargo no son libres de moverse a largas distancias de sus posiciones originales. Suponemos sólo un tipo de electrones libres, el otro tipo está fijo a la materia. Si no hay una fuerza eléctrica aplicada, los electrones se mueven indiscriminadamente en todas direcciones, de forma que no hay transferencia de electricidad en una dirección definida. Tan pronto como la fuerza eléctrica es aplicada esto cambia. Las velocidades de los electrones hacia un lado se incrementan, de manera que se forma una corriente eléctrica.
Albert Einstein (1879 - 1955) y Leopold Infeld (1898 - 1968)	Una corriente se da por la existencia de un campo eléctrico que fuerza el desplazamiento de la electricidad a través del conductor.

Durante el proceso de desarrollo del concepto de corriente eléctrica; se pueden señalar tres etapas. La primera de ellas abarca desde el siglo XVII, con la concepción de corriente eléctrica de Stephen Gray, hasta James Maxwell, la segunda, es representada por Joseph John Thomson, John Poynting y Oliver Heaviside, y la tercera etapa abarca el trabajo de Lorentz, Einstein e Infeld.

Durante la **primera etapa**, la concepción general de la electricidad es la de un fluido. Se reconocía la existencia de dos fluidos, y el movimiento de ambos para generar una corriente eléctrica; dicho fluido se encontraba presente en todos los cuerpos.

Una vez que se reconoció la existencia de dos fluidos, uno de electricidad vítrea y otro de electricidad resinosa; los modelos creados para describir el comportamiento de ambas

electricidades en la corriente eléctrica fueron haciéndose cada vez más complicados, hasta el punto, en el que Maxwell tiene que hacer dos teorías para describir los procesos por medio de los cuales se transfiere la electricidad.

Una de las concepciones que difiere de aquellas englobadas en esta etapa, es la de Oersted. Él veía a la corriente como un disturbio del medio conductor que se propagaba a lo largo del cable. Esta concepción es similar a la de la propagación de las ondas.

Los representantes de la segunda etapa, involucraron otros elementos en la concepción de corriente eléctrica, tales como energía, sistemas moleculares y conducción en electrolitos. Antes de esta etapa, sólo Franklin y Maxwell habían propuesto que el fluido estaba compuesto de partículas pequeñas.

Con la inclusión de estos elementos en la teoría electromagnética, la explicación de los fenómenos cambiaba en cuanto que ya que no sólo se describía el fenómeno eléctrico en términos de un fluido, sino que también había que tomar en cuenta los sistemas moleculares y la energía.

Por último, el concepto establecido por Lorentz, reconoce el movimiento de electrones como la corriente eléctrica, así como la fuerza necesaria para el movimiento y el campo eléctrico. Esta teoría, no considera elementos propuestos anteriormente, como los fluidos, los sistemas moleculares y la energía; por lo que disminuye la dificultad en estas teorías. Algunos de los elementos que facilitaron la creación de dicha teoría, fueron el descubrimiento del electrón y el desarrollo de la teoría cuántica.

Es importante mencionar que Einstein no aportó elementos nuevos al modelo de corriente eléctrica propuesto por Lorentz.

4. Principales ideas previas en los temas de corriente eléctrica y campo eléctrico y magnético

Las ideas previas han concentrado la atención de los investigadores dedicados a la enseñanza de la Ciencia en los últimos años. Esto se debe a que el hecho de que los estudiantes aprendan cada vez menos los contenidos científicos que se les enseña, ha alarmado tanto a profesores como a los investigadores. (Pozo, 2000) La razón de ello, es que las ideas previas interfieren con el aprendizaje de los estudiantes como se verá en este capítulo.

Aunado a lo anterior, hablaré de la relación que tienen los libros de texto, tanto en la permanencia como en la generación de las ideas previas en los estudiantes.

Por último, citaré las principales ideas previas de los temas de corriente eléctrica y campo eléctrico y magnético, que se han encontrado en diversas investigaciones. De esta forma, veremos cuáles son algunas de las teorías implícitas que los estudiantes utilizan para analizar los problemas relacionados con dichos conceptos.

4.1. Las ideas previas y los libros de texto

En los últimos años, la investigación sobre aprendizaje y enseñanza de las ciencias, se han enfocado al estudio de las ideas previas. Las ideas previas han sido nombradas de diferentes maneras; sin embargo, en esta tesis, las llamaremos **ideas previas**, describiendo con este término, **los enunciados donde se hace alusión a la interpretación de un proceso**.¹¹⁶ Antes de caracterizar las ideas previas, es necesario resaltar que no todas ellas son erróneas, antes bien algunas de ellas pueden considerarse correctas o parcialmente correctas.

La importancia de las ideas previas, radica en su determinación en el aprendizaje de los estudiantes; ya que ellos no llegan al aula sin conocimiento alguno de lo que ahí se enseña, antes bien, “llegan con una estructura cognitiva, elaborada a partir de la experiencia diaria, que le sirve para explicar y predecir lo que ocurre a su alrededor.”¹¹⁷

Aunados a la experiencias diarias, existen otros factores que influyen en la elaboración de las ideas previas (Driver, 1981):

- Un proceso combinado de inducción, intuición e imaginación del alumno.
- El uso de términos científicos en el lenguaje común.
- La influencia del entorno.

A continuación presentaré algunas de las características de las ideas previas, tomadas de dos fuentes (página web Ideas previas¹¹⁸, y Solís, 1984).

- Las ideas previas son de carácter implícito, esto es, en la mayoría de los casos los estudiantes no llevan a cabo una “toma de conciencia” de sus ideas y explicaciones.
- Las ideas previas que corresponden a conceptos y no a eventos, se encuentran, por lo general indiferenciadas, es decir presentan confusiones cuando son aplicadas a situaciones específicas.

¹¹⁶ <http://ideasprevias.cinstrum.unam.mx:2048>

¹¹⁷ Solís, R., Ideas Intuitivas y aprendizaje de las ciencias, p. 83.

¹¹⁸ <http://ideasprevias.cinstrum.unam.mx:2048>

- Las ideas previas son generadas a partir de procesos donde los cambios son evidentes, mientras que aspectos estáticos pasan, usualmente, desapercibidos.
- Las ideas previas son muy resistentes al cambio; *a veces* no cambian en absoluto, incluso después de varios años de contacto formal con las asignaturas. Cuando se produce el cambio, como resultado del estudio, puede no coincidir con lo previsto por el profesor.
- Las ideas previas interfieren en el aprendizaje de las ciencias, siendo responsables, en parte, de la dificultad que encuentran los alumnos en estas asignaturas y de su bajo rendimiento comparado con otras áreas.
- Los profesores, en buena medida, comparten las ideas previas de los alumnos.

Como hemos visto, las ideas previas pueden ser reconocidas mediante las características anteriores, de forma que pueden ser utilizadas para localizar las dificultades de los alumnos en el aprendizaje de la ciencia, así como para diseñar estrategias que ayuden a cambiarlas .

Dada la importancia de las ideas previas en la enseñanza y aprendizaje de las ciencias, se han seguido varias líneas acerca de los factores que las originan, así como también se han diseñado estrategias de enseñanza.

Uno de los factores al cual se le atribuye el origen de las ideas previas, **son los libros de texto**. Los estudios relacionados con la influencia de los libros de texto en las ideas previas, sin embargo, no son numerosos. La mayoría de los estudios relacionados con los libros de texto, no se enfocan a la influencia de estos en las ideas previas de los estudiantes, antes bien, consideran otros factores, como el uso de la historia en los libros de texto científicos, libros basados en el cambio conceptual, herramientas necesarias para la comprensión de los textos (Otero & Campanario 1990), etc. Los estudios existentes que dan cuenta de la relación entre los libros de texto y las ideas previas de los estudiantes, están enfocados a temas relacionados con la Química (Lybeck, Marton, Strömdahl, & Tullberg, 1988), pocos hay que traten temas relacionados con la Física (Dall'Alba, G., et. al., 1993).

Como mencioné anteriormente, el factor principal al cual se atribuye el origen de las ideas previas, son las experiencias cotidianas, aquellas que el alumno vive fuera del salón de clases. Sin embargo, hay pocas experiencias fuera de la escuela relacionadas con conceptos como el de campo eléctrico, campo magnético, átomo, electrones, por mencionar algunos. Esto nos lleva a pensar que las ideas previas de los estudiantes relativas a este tipo de conceptos, deben estar relacionadas principalmente con lo visto en el aula.

En el estudio realizado por Lybeck, et. al. (1988), encontraron que las confusiones acerca del concepto de mol encontradas en los libros de texto y profesores, son semejantes a aquellas expresadas por los alumnos. Estos resultados dan cuenta de la influencia que tienen los profesores y los libros de texto, en el entendimiento de los estudiantes.

Es importante mencionar que los textos tienen distintos grados de influencia en las concepciones de los estudiantes:

- La corriente eléctrica es parte de la terminología común, los estudiantes tienen contacto con ella a través de los aparatos eléctricos y la divulgación de la tecnología (Pozo, 2000). Por esta razón, los libros de texto pueden influir de dos formas en las ideas previas de los estudiantes correspondientes a la corriente eléctrica: reforzarlas u originarlas. Sin embargo, como se verá en el siguiente capítulo, la mayoría de las veces, los libros refuerzan las ideas previas que los estudiantes sostienen sobre corriente eléctrica.
- Los conceptos de campo eléctrico y magnético, no corresponden a la terminología común, los estudiantes no tienen experiencias cotidianas como lo tienen con la corriente eléctrica; sin embargo, no son del todo ajenos a algún fenómeno relacionado con estos conceptos. (imanes, electrificación por frotación). Por lo tanto, a diferencia de la influencia que tienen los libros de texto sobre las ideas previas de los estudiantes correspondientes a la corriente eléctrica; en la mayoría de los casos, las ideas previas de campo eléctrico y magnético que adquieren los estudiantes, es a través de los profesores y los libros de texto.

La influencia que los libros de texto tienen en ambos conceptos, se verá de forma

explícita con el análisis de los textos y su influencia en las ideas previas, en el siguiente capítulo.

En el campo de la Física, como ya se mencionó, se han realizado pocos estudios que reflejen la influencia de los libros de texto en el aprendizaje de los estudiantes. Un ejemplo de ello, es el análisis realizado por Dall'Alba (1993), en el cual muestra que los estudiantes comprenden el concepto de aceleración de forma incompleta. De forma que, los elementos que hacen falta en el entendimiento de los alumnos, corresponden a aquellos que hacen falta en los textos.

Otro ejemplo de la influencia de los libros de texto en las ideas previas de los estudiantes, lo podemos encontrar en *Lines of force: Faraday's and students' views* (Pocovi, M. & Finley, F., 2002) De acuerdo con los autores de este artículo, los libros de texto sólo presentan las líneas de fuerza como "líneas geométricas que son dibujadas siguiendo ciertas reglas dictadas por el campo eléctrico que existe en el espacio: el número de líneas por área es proporcional a la magnitud del campo eléctrico y la tangente a una línea de campo en cualquier punto tiene la dirección del vector de campo eléctrico en dicho punto."¹¹⁹

De aquí que los estudiantes tengan una visión reducida de las líneas de fuerza, y sea un concepto poco comprendido por ellos.

En el caso en el que los estudiantes basen su estudio en los libros de texto, lo cual es común, enunciados imprecisos o faltantes en los libros, pueden tener un impacto considerable en los estudiantes. Esto es importante debido a que la enseñanza de la ciencia, y en particular la enseñanza de la Física se basa en los libros de texto (Stinner, 1992).

Como veremos en el siguiente capítulo, cada libro tiene un enfoque diferente, por lo que cada uno promueve un entendimiento diferente del mismo fenómeno. Los problemas,

¹¹⁹ Pocovi, M. & Finley, F., *Lines of force: Faraday's and students' views*, p. 460.

aunque no son parte fundamental en el análisis de los textos, pueden también reforzar los conceptos incompletos o ser una ayuda real para el entendimiento de los mismos.

4.2. Las ideas previas y la historia

La historia de la ciencia y su influencia en la enseñanza y aprendizaje de la ciencia, es un área que ha ido creciendo en importancia dentro del campo de la enseñanza de la ciencia. Al igual que los libros de texto, la historia dentro de la enseñanza, tiene varios aspectos de estudio. Uno de ellos es la resistencia al cambio de algunas ideas previas. De acuerdo con Sequeira & Leite (1991), esta resistencia al cambio también puede ser encontrada en la historia de la ciencia, como la idea del éter.

Otro aspecto es el paralelismo presente entre el desarrollo conceptual de los estudiantes y el desarrollo de los conceptos a lo largo de la historia, aunque no siga exactamente las mismas etapas (Benseghir, 1989, Wandersee, 1985). Sin embargo, considerar la evolución de algunos conceptos, puede consumir mucho tiempo de clase; pero, ya que "la mayoría de las ideas previas de los estudiantes han aparecido en la historia de la ciencia, el conocimiento de esto, puede ayudar a los maestros a anticipar las concepciones previas de sus estudiantes o, en las palabras de Ausubel (Ausubel, Novak, & Hanesian, 1980), saber lo que los estudiantes ya saben."¹²⁰

Así, en aquellas situaciones en las que los científicos presentaban argumentos y teorías contradictorias, puede esperarse ideas previas de los alumnos (Wiser and Carey, 1983; Arons, 1990; Sequeira & Leite, 1991; Whiteley, 1993). Un claro ejemplo de ello, es la concepción de éter sugerida por Faraday y sostenida por Maxwell y Lorentz, entre otros, y que fue eliminada por Einstein. La concepción de un medio necesario para las transmisiones eléctricas -éter- es mantenida por los estudiantes hoy en día (Bar, V., Zinn, B. & Rubin, E., 1997).

¹²⁰ Sequeira, M. & Leite, L., Alternative conceptions and history of science in physics teacher education, p.53.

El análisis comparativo histórico que se presentará en el siguiente capítulo, nos permitirá observar los experimentos, y discusiones que ayudaron a construir las concepciones de campo eléctrico, campo magnético y corriente eléctrica, y que son considerados o dejados de lado por los libros de texto, entre otros aspectos que serán analizados.

4.3. Principales ideas previas en electromagnetismo

Las ideas previas relacionadas con el electromagnetismo, han sido objeto de un gran número de investigaciones. Predominan los estudios que tienen como tema los circuitos eléctricos, seguidos de aquellos que tratan la corriente eléctrica, fuerzas y campo eléctrico y magnético y por último electrostática¹²¹.

El interés de los investigadores en los temas de electromagnetismo, radica primeramente en que el electromagnetismo es parte central en los estudios de física o ciencias en todos los niveles educativos (primaria, secundaria, bachillerato y por supuesto, universidad); la segunda razón, es que los conceptos involucrados en la teoría electromagnética son altamente abstractos y complejos de tal forma que la mayor parte de su entendimiento depende de los modelos, analogías y metáforas, los cuales son difíciles por naturaleza. (Duit, Jung & von Rhöneck, 1985). Los problemas en el aprendizaje del campo eléctrico y magnético y la corriente eléctrica, son reflejados en las ideas previas expresadas por los estudiantes, y que veremos más adelante en este mismo apartado.

Tanto las referencias de los artículos como las ideas previas que mencionaré durante este capítulo y el siguiente, se encuentran en la página <http://ideasprevias.cinstrum.unam.mx:2048>. Dentro de esta página, se encuentran también, los criterios utilizados para seleccionar las ideas previas y las fuentes de las cuales fueron extraídas -revistas internacionales arbitradas, memorias que contaron con

¹²¹ Datos obtenidos de la página <http://ideasprevias.cinstrum.unam.mx:2048>

un proceso de arbitraje o de eventos internacionales, etc-.

A pesar de que las ideas previas sobre los conceptos que trata esta tesis, son numerosos, al enfocarnos en las ideas previas encontradas en estudiantes universitarios, el número se reduce. Esta es una de las razones por las cuales retomaremos las ideas previas de los estudiantes de bachillerato.

4.3.1. Principales ideas previas en el tema de corriente eléctrica

En este apartado, haré un listado de las principales ideas previas presentes entre los alumnos de bachillerato y universidad correspondientes al tema de corriente eléctrica.

Para designar las ideas previas encontradas en estudiantes de bachillerato, utilizaré la letra **b**, y **u** cuando sean de estudiantes **universitarios**. Después de cada idea, entre paréntesis, se indica si es correcta, parcialmente correcta o incorrecta. Las principales ideas previas, se citan a continuación.

b1 *La corriente en un circuito se conserva*¹²². (correcta)

b2 *Toda la corriente que sale de la batería regresa a ella.* (incorrecta: en esta concepción se considera a la corriente como un fluido que se encuentra almacenado en la batería. La corriente no es un fluido, sino un movimiento de electrones, los cuales no se encuentran almacenados en la batería; antes bien son electrones que forman parte de los elementos conductores -cables principalmente- del circuito.)

b3 *Para que haya corriente en un circuito simple, necesita haber dos conexiones separadas hacia el foco y la batería.* (correcta)

b4 *La corriente eléctrica es un movimiento o flujo de cargas.* (parcialmente correcta: la corriente eléctrica sí es un movimiento de cargas, pero no debe identificarse como un fluido, cosa que ocurre frecuentemente en los alumnos.)

¹²² Considerar que la corriente en un circuito se conserva, es equivalente a considerar la conservación de la carga en un circuito eléctrico.

b5 *La corriente eléctrica es energía*¹²³. (incorrecta: la corriente eléctrica no es energía. A los portadores de carga se les asocia una energía cinética debido a su movimiento, parte de la cual se disipa en forma de calor.)

b6 *En un circuito eléctrico simple, con una batería y una barra metálica, la carga en la batería es transferida al metal.* (incorrecta: esta concepción es similar a b2, la cual expresa que los electrones que forman la corriente eléctrica se encuentran almacenados en la batería; siendo que los electrones que conforman la corriente eléctrica se encuentran en los materiales conductores del circuito.)

b7 *En un circuito eléctrico simple, con una batería y una barra metálica, la corriente eléctrica se produce por la diferencia en la temperatura entre la batería y el metal.* (incorrecta: la corriente eléctrica -movimiento de portadores de carga- en un circuito se produce por la fuerza que se manifiesta por la interacción con el campo eléctrico con los portadores de carga.)

b8 *La corriente eléctrica es producida en un metal por los átomos que emiten protones porque sobran, y jalan electrones para balancear el número de protones y electrones, ya que los átomos no deben ser positivos ni negativos.* (incorrecta: la corriente eléctrica -movimiento de portadores de carga- en un circuito se produce por la fuerza que ejerce el campo eléctrico sobre los portadores de carga)

b9 *La corriente eléctrica en un circuito simple formado por una batería un foco y una barra metálica, se produce porque existe una diferencia de potencial entre los extremos de la barra metálica, de esta manera los electrones van del punto de mayor potencial al de menor potencial.* (incorrecta: aunque entre los extremos del metal pueda haber una diferencia de potencial, no es esta la que se relaciona con el movimiento de electrones en el circuito, es la diferencia de potencial de la batería.)

b10 *La corriente eléctrica a través de un metal es producida por el abastecimiento de electrones, entonces los electrones se mueven libremente porque hay muy pocos. Después adquieren alta velocidad, lo que produce el flujo de electrones.* (incorrecta: los electrones que forman la corriente eléctrica, se encontraban inicialmente en los conductores del circuito, de tal forma que una vez que se tienen los conductores y la

¹²³ Los estudiantes generalmente consideran la energía como una sustancia, atribuyéndole propiedades materiales, y considerándola como una especie de combustible que se almacena en los cuerpos; en el caso de los circuitos eléctricos la energía se almacena en la pila, y una vez que se gasta, es necesario reponerla de alguna manera. En el caso de esta concepción, los estudiantes identifican la corriente eléctrica con esta energía almacenada en la pila.

batería, no entran más electrones al circuito)

b11 *La corriente en un circuito en serie es como un grupo de personas caminando a través de un túnel. El mismo número de personas que entran al túnel, salen de él.* (correcta: en cuanto hace referencia a la conservación de la carga en un circuito)

b12 *La corriente es como un autobús que recoge gente en la estación (batería) y los baja en la parada (foco), después regresa a la estación.* (incorrecta: esta concepción hace referencia a que la corriente es transportada desde la batería a los elementos del circuito, lo cual es una idea incompatible a la de la corriente como un movimiento de electrones.)

b13 *La corriente es como un hombre que entrega paquetes (Energía) al cliente (foco). Por lo tanto, el foco sólo gasta la energía no la corriente.* (incorrecta: parte de la energía asociada a los portadores de carga se disipa al circular la corriente a través de una resistencia, lo cual no es equivalente a decir que el foco gasta la energía. Ahora bien, la concepción de los estudiantes de ver a la corriente eléctrica como un medio de transporte de la energía, no es correcto, ya que, como se ha dicho, los portadores no llevan energía de un lado a otro, antes bien, sólo se les asocia energía debido a su movimiento.)

b14 *En un circuito con un foco y una batería, las corrientes positiva y negativa viajan a través de cables separados y se juntan en el foco para producir calor y luz.* (incorrecta: la corriente no es positiva o negativa, antes bien los portadores de carga que forman la corriente son lo que pueden tener carga positiva o negativa. Por lo tanto, tampoco se puede decir que cada tipo de corriente viaje por cables separados. Se puede considerar el movimiento de los portadores de carga es en una dirección.)

b15 *La corriente viaja a la velocidad de la luz.* (incorrecta: los portadores de carga se mueven con una velocidad pequeña en comparación con la de la luz.)

b16 *La corriente es como un montón de electricidad –pedazos-, todos van a través de una línea torcida.* (incorrecta: los estudiantes conciben la corriente eléctrica como una sustancia moviéndose de forma ordenada en una dirección.)

b17 *La corriente eléctrica es consumida por los elementos del circuito.* (incorrecta: la corriente eléctrica no es un combustible que pueda ser gastado por los elementos del circuito, antes bien, es el movimiento de los portadores de carga por la interacción con un campo eléctrico.)

b18 *La electricidad es algo en la batería que puede ir a través de los cables.* (incorrecta: la corriente eléctrica no se almacena en la batería, es el movimiento de electrones que se

encontraban previamente en los elementos conductores del circuito -cables principalmente- debido al potencial eléctrico de un campo.)

u1 *La electricidad es el flujo de una sustancia que se mueve.* (incorrecta: la corriente eléctrica es el movimiento de portadores de carga, no una sustancia continua.)

u2 *La corriente eléctrica es consumida por los elementos del circuito.* (incorrecta: la corriente eléctrica no es un combustible que pueda ser gastado por los elementos del circuito, antes bien, es el movimiento de los portadores de carga por la acción de un campo eléctrico.)

u3 *La fuente de poder está empujando la corriente a través del secador de cabello.* (incorrecta: lo que hace que los portadores de carga se muevan es la fuerza debida a la diferencia de potencial.)

u4 *La fuente de poder empuja una pequeña cantidad de carga a través de la resistencia.* (incorrecta: lo que hace que los portadores de carga se muevan es la fuerza que ejerce sobre ellos la diferencia de potencial debida al campo eléctrico.)

A diferencia de lo que sucede con las ideas sobre campo eléctrico y magnético, existen más estudios enfocados a encontrar las ideas previas de los estudiantes de bachillerato sobre el tema de corriente eléctrica; mientras que son muy pocas las que realizan estudios con estudiantes universitarios.

Es importante mencionar que las ideas previas no son oraciones simples ni aisladas, sino que forman parte de teorías implícitas que los alumnos utilizan para explicarse los fenómenos. Es por esta razón, que es importante analizar con cuidado las ideas presentadas, de tal forma se podrán obtener las teorías implícitas de los estudiantes.

4.3.2. Principales ideas previas en el tema de campo eléctrico y magnético

Las principales ideas previas en el tema de campo eléctrico y magnético, son:

b1 *Una carga positiva crea un campo eléctrico con intensidad E en un punto cercano P . Si una carga negativa es colocada en el punto P , el vector de intensidad de campo eléctrico será el mismo, ya que sólo depende de la carga que crea el campo, esto es, la carga positiva. De esta manera, el vector de intensidad apuntará hacia fuera de la carga positiva.* (correcta)

b2 *A una distancia de la carga Q , se coloca una pequeña carga q . La interacción eléctrica entre ellas empieza instantáneamente. La fuerza de interacción no depende del tiempo.* (incorrecta: las interacciones entre las cargas no son instantáneas; antes bien, el tiempo que tarda la interacción en darse, corresponde al tiempo que tarda en propagarse el campo eléctrico de la carga Q a la carga q .)

b3 *La fuerza eléctrica necesita aire como su medio conductor.* (incorrecta: las fuerzas que se ejercen entre sí las partículas cargadas se registran también en el vacío. Estas fuerzas son descritas por la ley de Coulomb)

b4 *El tamaño del imán incrementa el campo ya que hay más cargas en cada extremo.* (incorrecta: el campo magnético no se debe a la acumulación de cargas eléctricas. Se asocia un campo magnético a la corriente eléctrica, y en el caso de los imanes la intensidad del campo magnético queda descrita a través de la intensidad de los polos magnéticos.)

b5 *En un imán hay cargas circulando, éstas crean los campos eléctrico y magnético.* (parcialmente correcta: el magnetismo en la materia se puede explicar por una multitud de pequeñas espiras de corriente eléctrica distribuidas en la materia. Sin embargo, en un imán sólo se puede detectar un campo magnético, no un eléctrico.)

b6 *Los efectos magnéticos son sentidos por los objetos que son colocados en la región alrededor del imán, ya que esta región es una esfera de influencia.* (parcialmente correcta: aunque al colocar un imán cerca de otro las fuerzas entre ambos sean más intensas, esto no implica que el campo magnético sea una esfera de influencia. El campo magnético debe ser visto como una cantidad vectorial que ayuda a describir las

interacciones entre partículas cargadas)

b7 *Los campos magnéticos son campos positivos o negativos que se atraen entre ellos, o campos positivos que se repelen. Este campo está lleno de electrones o partículas negativas.* (incorrecta: el campo magnético tiene polaridad y su atracción o repulsión con otros depende de la orientación entre los polos y no está constituido de partículas eléctricas; es, en todo caso generado por cargas en movimiento.)

b8 *La probabilidad de atraer cosas de un imán se debe a la carga positiva en un extremo y la carga negativa en el otro. Así, el campo negativo busca las partes positivas del metal con el fin de alcanzar estabilidad.* (incorrecta: los extremos de los imanes se llaman polos. Estos polos se atraen si son opuestos y se repelen si son iguales.)

b9 *Cuando se colocan dos imanes juntos, cada uno ejerce una fuerza magnética en el otro. Esta fuerza magnética depende de la distancia entre ellos o entre ambos polos. Esto es, entre más cerca estén mayor es la fuerza.* (correcta)

b10 *Las fuerzas magnéticas actúan aún cuando no haya contacto entre los imanes, porque existe un campo magnético entre ellos. Si se están atrayendo entre ellos, uno produce un campo convergente y otro uno divergente.* (incorrecta: el campo es un elemento que ayuda a describir las interacciones entre partículas cargadas, y en este caso, puedo tener un campo magnético a partir de un imán. Pero el campo no es el intermediario de las fuerzas magnéticas, antes bien sólo las describe.)

b11 *La atracción magnética se expande en el espacio en ondas que necesitan aire como su medio conductor.* (incorrecta: las ondas electromagnéticas pueden viajar en el vacío, sin la necesidad de un medio conductor)

u1 *No puede haber un campo eléctrico en un lugar donde las cargas no se puedan mover.* (incorrecta: una de las componentes de una onda electromagnética es un campo eléctrico. Cuando una onda viaja en el vacío, existe un campo eléctrico y no hay cargas que se muevan.)

u2 *No puede haber un campo eléctrico en un punto si no hay una fuerza sobre una carga actuando en ese punto.* (correcta)

u3 *Para que exista campo eléctrico en un punto, algunos electrones o protones necesitan*

estar viajando desde la carga activa¹²⁴ a un punto determinado. (incorrecta: un campo electrostático se asocia a una carga eléctrica puntual, sin que se encuentren otras partículas cerca de las carga y sin que estén en movimiento.)

u4 *Las cargas necesitan estar en movimiento para crear un campo eléctrico. (incorrecta: una carga puntual estática tiene asociado un campo electrostático)*

u5 *Un campo eléctrico puede ser producido por una corriente, por una carga eléctrica puntual, o por un campo eléctrico variable. (parcialmente correcta: un campo eléctrico no es producido por una corriente, antes bien, la corriente eléctrica es generada por un campo eléctrico.)*

u6 *Los campos eléctricos y magnéticos son energía almacenada en un medio. (incorrecta: los campos eléctricos y magnéticos son cantidades vectoriales que ayudan a describir la interacción entre partículas cargadas. Se les puede asociar una energía debido a una configuración -distribución de carga en el caso del campo eléctrico, y un solenoide en el caso del campo magnético-)*

u7 *Una carga positiva crea un campo eléctrico con intensidad E en un punto cercano P . Si una carga negativa es colocada en el punto P , el vector de intensidad de campo eléctrico será el mismo, ya que sólo depende de la carga que crea el campo, esto es, la carga positiva. De esta manera, el vector de intensidad apuntará hacia fuera de la carga positiva. (correcta)*

u8 *Una carga positiva crea un campo eléctrico con intensidad E , en un punto cercano P . Si una carga negativa es puesta en el punto P , el vector de intensidad de campo eléctrico, irá ahora en sentido opuesto, ya que la carga que se colocó es negativa, y cargas de signo opuesto se atraen entre sí. (incorrecta: el campo eléctrico de la carga positiva no se ve alterado por lo que el vector de campo permanece sin cambios.)*

u9 *A una distancia de la carga Q , se coloca una pequeña carga q . La interacción electromagnética entre ellas, se propaga a la velocidad de la luz, entonces tardará un tiempo en llegar, aunque si la distancia es corta, este tiempo no se notará. (correcta)*

u10 *Si una carga es colocada en un campo eléctrico, en un lugar por donde pase una línea de fuerza, la carga sufrirá un desplazamiento debido a que existe una fuerza. Si la carga es positiva o negativa, se moverá en direcciones opuestas. La carga empezará a*

¹²⁴ La carga activa se refiere a aquella a la que se le asocia el campo eléctrico.

seguir un camino tangente a la línea de fuerza porque la fuerza que actúa es tangente a dichas líneas. (parcialmente correcta: las líneas de fuerza son sólo una forma de representar la dirección de la interacción entre las cargas, por lo que no se puede colocar una partícula en un lugar donde pase una línea de fuerza.)

u11 *Si una carga es colocada en un campo eléctrico, en un lugar por donde pase una línea de fuerza, la carga sufrirá un desplazamiento debido a que existe una fuerza. La fuerza será tangente a las líneas y la carga seguirá el camino trazado por las líneas de fuerza que existen en la distribución. (incorrecta: la dirección de la fuerza es tangente en cada punto a las líneas de fuerza, por lo que el desplazamiento de la partícula no seguirá la dirección de una línea de fuerza. Por otro lado, las líneas de fuerza son sólo instrumentos de descripción del campo, no son físicamente reales.)*

u12 *Si una carga es colocada en un campo eléctrico, en un lugar por donde pase una línea de fuerza, la carga sufrirá un desplazamiento debido a que existe una fuerza. Es como si la carga fuera transportada por la línea de fuerza sin alguna acción o interferencia en su trayectoria. (incorrecta: las líneas de fuerza no son las intermediarias de las fuerzas eléctricas. Sólo dan una descripción del campo en cuanto a dirección e intensidad.)*

u13 *Si una carga es colocada en un campo eléctrico, en un lugar por donde pase una línea de fuerza, la carga sufrirá un desplazamiento debido a que existe una fuerza. Las fuerzas seguirán la trayectoria de las líneas. La carga también sigue esa trayectoria, movida por las fuerzas. (incorrecta: la dirección de la fuerza es tangente en cada punto a las líneas de fuerza, por lo que el desplazamiento de la partícula no seguirá la dirección de una línea de fuerza. Por otro lado, las líneas de fuerza son sólo instrumentos de descripción del campo, no son físicamente reales.)*

u14 *Si una carga es colocada en un campo eléctrico, en un lugar por donde no pase una línea de fuerza; la carga sufre una fuerza, ya que se puede hacer que una línea pase por ahí. (incorrecta: al dibujar las líneas de fuerza para visualizar el campo eléctrico, no significa que sólo haya campo eléctrico donde se dibujan las líneas, antes bien, la función que describe el campo depende de la distribución de carga al cual se le asocie.)*

u15 *Si una carga es colocada en un campo eléctrico, en un lugar por donde no pase una línea de fuerza; una línea de fuerza se origina en ese lugar. A pesar de que el diagrama no presente una línea de fuerza que pase a través de la carga, la línea existe y la carga seguirá la trayectoria de la línea. (incorrecta: al dibujar las líneas de fuerza para visualizar*

el campo eléctrico, no significa que sólo haya campo eléctrico donde se dibujan las líneas, antes bien, la función que describe el campo depende de la distribución de carga al cual se le asocie.)

u16 *Si una carga es colocada en un campo eléctrico, en un lugar por donde no pase una línea de fuerza; la carga no sufrirá ninguna fuerza debido a que no es afectada por ninguna línea.* (incorrecta: siempre que una partícula sea colocada en un campo eléctrico, sentirá una fuerza debida al campo. Las líneas de fuerza son sólo un instrumento para representar algunas características del campo eléctrico, como la intensidad o dirección.)

u17 *Un campo magnético variable está relacionado con un campo magnético producido por una corriente.* (incorrecta: un campo magnético variable puede generarse a partir de una corriente eléctrica variable.)

De las ideas anteriores se puede observar que es mayor el número de estudios enfocados a indagar las ideas previas de campo eléctrico en estudiantes universitarios que de bachillerato.

4.4. Análisis jerárquico de los principales conceptos de los alumnos

Como mencioné en el apartado anterior, las ideas previas no son oraciones simples ni aisladas, sino que forman parte de “un sistema cognitivo que intenta dar sentido a un mundo definido no sólo por las relaciones entre los objetos físicos que pueblan el mundo, sino también por las relaciones sociales y culturales que se establece en torno a esos objetos.”¹²⁵

Sin embargo, existen otras posiciones con respecto a las ideas previas. También, se consideran como representaciones creadas por los sujetos en una situación específico,

¹²⁵ Pozo, I. & Gómez Crespo, M., Aprender y enseñar ciencia, p.103.

de tal forma, que se construyen de acuerdo con las demandas contextuales del momento, sin que permanezcan en el sistema cognitivo del sujeto (Rodrigo 1997, Rodrigo y Correa, 1999).

Para reconocer los modelos utilizados por los sujetos a partir de las ideas previas, es necesario realizar un análisis que agrupe las ideas previas de tal forma que se pueda establecer un orden jerárquico de los elementos de interpretación que presenten los sujetos. Este análisis jerárquico fue propuesto por Flores, López y Gallegos (2001), como una respuesta al hecho de que las teorías previas presentan un nivel de coherencia y estabilidad; considerando las ideas previas como teorías implícitas, marcos de referencia, etc. (Tytler, 1998, Wandersee, Mintzes y Novak, 1994, Driver et. Al., 1985).

La categorización sugerida por Flores, López y Gallegos (2001), permitirá “organizar las ideas previas desde su implicación inmediata, es decir, lo que cada idea previa significa en torno a una situación particular, hasta una posible interpretación de un conjunto de ideas previas que daría cuenta de un amplio conjunto de fenómenos...”¹²⁶

Los niveles de categorización, corresponden a **concepción**, **categoría** y **marco**. Estos niveles de organización de las ideas previas, tienen su origen en el trabajo de Gilbert y Watts (1983).

Los términos mencionados, no tendrán el mismo significado brindado por Gilbert y Watts, antes bien, sólo se utilizarán para organizar las ideas previas.

El primer nivel en el que serán agrupadas las ideas previas ya presentadas, es el de **concepción**. Bajo este nivel serán colocadas las ideas que posean el mismo significado, es decir que se refieran al mismo fenómeno.

El segundo nivel de agrupación, será el de **categoría**. Bajo este nivel, será puestas las ideas que se refieran a un campo más amplio de explicación.

El tercer y último nivel de agrupación, es el de **marco**. Este nivel representa la mayor

¹²⁶ Flores, F., López, A. & Gallegos, L., Elementos y parámetros de organización de las ideas previas, p.1.

síntesis posible de las ideas previas.

La categorización de las ideas previas se realizará tomando en cuenta el nivel educativo (bachillerato o universidad), y el tema (corriente eléctrica, campo eléctrico y magnético). De esta forma, se presentan cuatro esquemas que corresponden a las siguientes categorizaciones:

- a. Categorización de las ideas previas de corriente eléctrica en bachillerato.
- b. Categorización de las ideas previas de corriente eléctrica en universidad.
- c. Categorización de las ideas previas de campo eléctrico y magnético en universidad.
- d. Categorización de las ideas previas de campo eléctrico y magnético en bachillerato.

Se muestra en primer lugar la categorización de ideas previas de campo eléctrico y magnético en universidad, debido a que es donde hay más cantidad de ideas. El análisis de estas ideas será más completo y por lo tanto, será más fácil analizar las ideas previas de campo presentes en estudiantes de bachillerato.

Tomando en cuenta los niveles de agrupación de las ideas previas, mencionados anteriormente, utilizaré la letra **c**, para designar las concepciones, **C** para las categorías y **M** para los marcos. También seguiré utilizando las letras **b** para el nivel bachillerato y **u** para el nivel universitario. Las concepciones se han numerado de forma consecutiva, c1, c2,... Existen concepciones que son comunes a los dos niveles educativos (bachillerato y universidad); por lo que se designarán con el mismo número. Las categorías y marcos, serán exclusivas de cada nivel, por lo que aparecerán con una letra b al final si son de bachillerato C1b, C2b,...M1b,M2b,... y una u al final si son de universidad, C1u, C2u,... M1u,M2u,...

Cada concepción, tendrá entre paréntesis el número de las ideas previas que agrupa, de acuerdo como se los designé en el apartado anterior. De igual manera, al final de cada categoría aparecerá entre paréntesis el número de cada concepción que agrupa. También se hará lo mismo con los marcos, aunque, en algunos casos, los marcos también agruparán concepciones que no estén contenidas en ninguna categoría.

4.4.1. Categorización de las ideas previas de corriente eléctrica en bachillerato.

De acuerdo con el formato ya establecido, las ideas previas correspondientes al tema de corriente eléctrica a nivel bachillerato, pueden ser agrupadas bajo las siguientes concepciones:

- c1.** La corriente eléctrica es un flujo de electrones¹²⁷. (b4, b10)
- c2.** La corriente eléctrica es energía. (b13, b5)
- c3.** La corriente está formada de partículas en movimiento. (b13, b16)
- c4.** Hay dos tipos de corriente: positiva y negativa. (b14)
- c5.** La corriente eléctrica es gastada por los elementos del circuito. (b12, b13.)
- c6.** Los componentes del circuito transforman la corriente en luz y calor. (b13, b14)
- c7.** La corriente deja la batería por una terminal y regresa a ella por la terminal contraria¹²⁸. (b2, b11, b12)
- c8.** La corriente sale de los dos polos de la batería hacia los elementos del circuito. (b3, b14)
- c9.** La corriente viaja a la velocidad de la luz. (b15)
- c10.** La batería transfiere cargas almacenadas que conforman la corriente a los elementos del circuito. (b2, b6, b10)
- c11.** La corriente eléctrica se produce por la diferencia de potencial que existe entre dos puntos del circuito. (b9)
- c12.** La corriente eléctrica en un circuito se conserva. (b1, b2, b11)

Es importante recordar que los números que aparecen entre paréntesis, corresponden a las ideas presentes en estudiantes de bachillerato, concernientes al tema de corriente eléctrica. Estas ideas fueron enlistadas en el apartado 5.2.1.

¹²⁷ Esta concepción puede considerarse como que la corriente eléctrica es el movimiento de electrones, lo cual es correcto. Sin embargo, la mayoría de los estudiantes consideran el flujo de electrones como un fluido que consta de electrones.

¹²⁸ La concepción es incorrecta, debido a la consideración de que la corriente está almacenada en la batería.

De las concepciones anteriores, se puede observar que las primeras cuatro (c1 - c4), tratan sobre la naturaleza de la corriente. Las concepciones 5 y 6, expresan la influencia que tienen los componentes del circuito en la corriente. Las concepciones 7 , 8 y 9 describen la forma en la que circula la corriente eléctrica en un circuito; c10 y c11 describen cómo se genera la corriente eléctrica y la última concepción describe una característica de la corriente eléctrica en un circuito.

Como hemos visto, el tópico al que hace referencia la mayoría de las concepciones, corresponden al de circuitos eléctricos. De aquí, que los estudiantes expresen los distintos modelos de corriente eléctrica que utilizan para analizar los problemas de circuitos eléctricos. Por lo cual, la naturaleza de la corriente, se deja un poco de lado.

Las concepciones pueden ser agrupadas dependiendo de su semejanza en cuanto a contenido conceptual en las siguientes categorías:

C1b. La corriente disponible en un circuito se encuentra almacenada en la batería. (c7, c8, c10)

C2b. La corriente es el flujo de "algo" que se mueve a través de los cables y elementos del circuito en una dirección. (c1, c3, c7)

C3b. La corriente en un circuito eléctrico es gastada o transformada. (c5, c6)

En la concepción dos están agrupadas las ideas que indican que la corriente es el movimiento de electrones, cargas; de tal forma que he utilizado el término "algo" para agrupar todos estos términos.

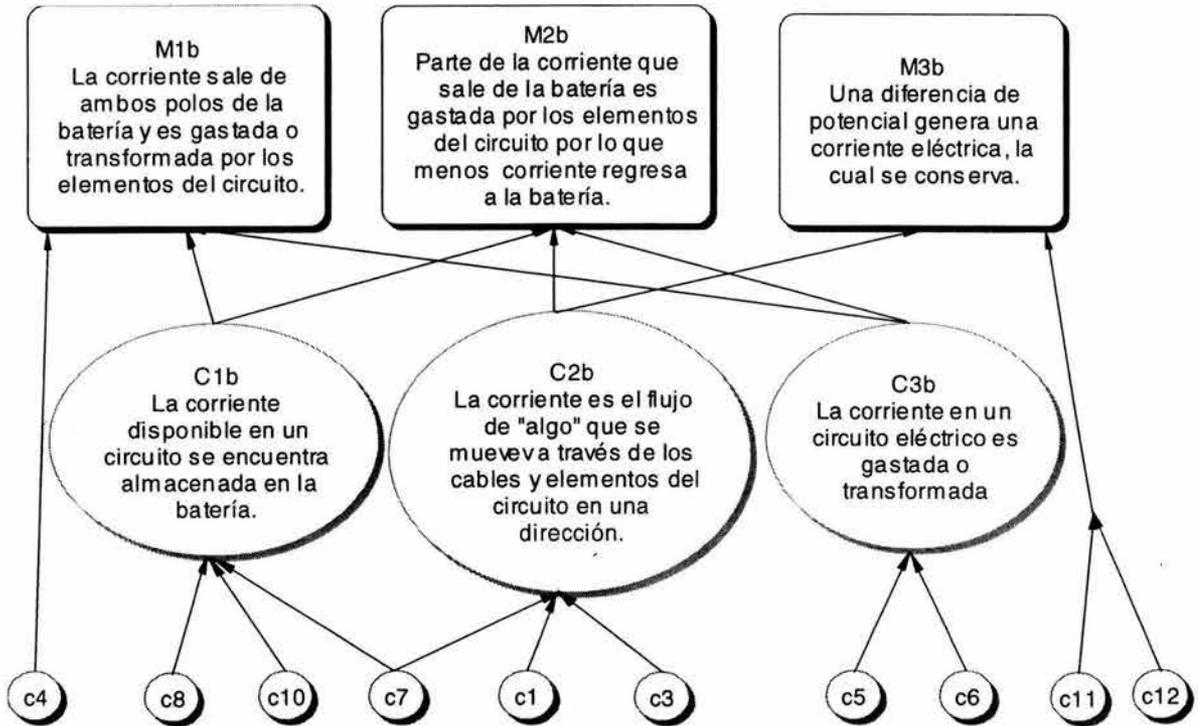
A estas categorías se les pueden asignar los marcos con los cuales se agrupan las ideas previas reportadas.

M1b. La corriente sale de ambos polos de la batería y es gastada o transformada por los elementos del circuito. (C1, C3, c4)

M2b. Parte de la corriente que sale de la batería es gastada por los elementos del circuito por lo que menos corriente regresa a la batería. (C1,C2,C3)

M3b. **Una diferencia de potencial genera una corriente eléctrica, la cual se conserva.** (C2, c11, c12)

Un esquema que caracteriza esta interpretación es:



Esquema 1. Categorización de las ideas previas de corriente eléctrica en bachillerato

El esquema anterior refleja los tres marcos bajo los cuales los estudiantes se explican la corriente eléctrica, así como su comportamiento en los circuitos.

El primer marco corresponde al **modelo de corrientes concurrentes**. En este modelo, las corrientes salen de ambos polos de la batería y al llegar al foco, son transformadas en luz.

El segundo corresponde al **modelo de gasto**. Este modelo considera un tipo de corriente que viaja a través del circuito en una dirección y los elementos del circuito gastan parte de la corriente por lo que regresa menos corriente a la batería de la que salió.

El último marco, describe el comportamiento de la corriente eléctrica, el cual es correcto

desde el punto de vista científico.

Los modelos mencionados, han sido ya reportados por investigadores tales como Shipstone (1985) y Pozo (2000).

Es importante hacer notar, que un elemento común a los tres marcos, es la consideración de la corriente como "algo" que fluye en el circuito. Ya sea electrones, una substancia, cargas, etc. Hay estudiantes que consideran a la corriente como energía, por lo que esta también circula y es gastada por los elementos del circuito.

4.4.2. Categorización de las ideas previas de corriente eléctrica en universidad.

La lista de ideas previas relacionadas con el tema de corriente eléctrica a nivel universitario, presentadas anteriormente, no es tan numerosa como la de bachillerato. Esto se debe a que la mayoría de las investigaciones que tratan la corriente eléctrica se enfocan a estudiantes de bachillerato. Es en el bachillerato y la secundaria en donde los estudiantes tienen los primeros contactos con los circuitos eléctricos y por lo tanto con la corriente eléctrica.

Debido a que son pocas las ideas previas presentadas en esta parte, las incluiremos en las concepciones, categorías y marcos ya establecidos para el nivel de bachillerato. Esto es, tomaremos la numeración utilizada para el nivel bachillerato, continuando con ella siempre que una nueva concepción sea formada a partir de las ideas previas de corriente eléctrica a nivel universitario.

Por lo tanto, las concepciones presentes en este nivel, bajo las cuales podemos agrupar las ideas previas, son:

c3. La corriente está formada de partículas en movimiento. (u4)

c5. La corriente eléctrica es gastada por los elementos del circuito. (u2)

c13. La corriente es una sustancia en movimiento. (u1)

c14. La fuente de poder empuja la corriente a través del circuito. (u3,u4)

Como podemos observar, el cuestionamiento sobre la naturaleza de la corriente eléctrica, sigue presente en este nivel. Aunque surgen nuevos elementos como la noción de la fuerza necesaria para hacer que los electrones se muevan, de aquí la concepción 14.

Las concepciones presentes en este nivel, pueden quedar contenidas en las siguientes categorías:

C1u. *La corriente es el flujo de "algo" que se mueve a través de los cables y elementos del circuito en una dirección.* (c3,c13)

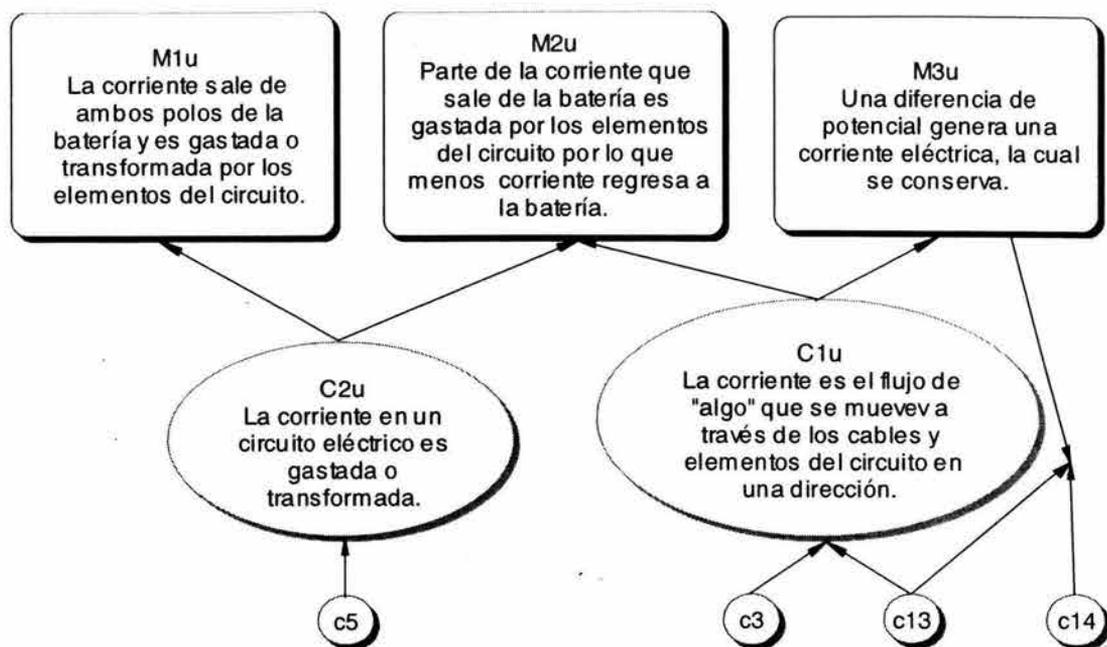
C2u. *La corriente en un circuito eléctrico es gastada o transformada.* (c5)

Ya que dos de las tres categorías están presentes, y está explícita la necesidad de un voltaje para que se genere una corriente eléctrica, se puede suponer que los estudiantes universitarios también utilizan los tres marcos establecidos para el nivel bachillerato.

Esto, tomando en cuenta una de las características de las ideas previas: son muy resistentes al cambio; a veces no cambian en absoluto, incluso después de varios años de contacto formal con las asignaturas. La cual ya ha sido discutida al inicio de este capítulo y sustentada por varias investigaciones (página web Ideas previas¹²⁹, y Solís, 1984).

Por lo tanto, un esquema que caracteriza la interpretación anterior, es:

¹²⁹ <http://ideasprevias.cinstrum.unam.mx:2048>



Esquema 2. Categorización de las ideas previas de corriente eléctrica en universidad

Los marcos anteriores, muestran los esquemas bajo los cuales los estudiantes explican los circuitos eléctricos; y que fueron explicados anteriormente.

Es importante mencionar que aunque el nivel es universitario, los estudiantes utilizan dos términos para referirse a la corriente eléctrica: sustancia y cargas. También utilizan otros tipos de términos en sus explicaciones, como fuerza, voltaje, etc. Esto debido a que el nivel de instrucción es mayor.

4.4.3. Categorización de las ideas previas de campo eléctrico y magnético en universidad

Las investigaciones dedicadas a encontrar las ideas previas que los estudiantes universitarios poseen sobre campo eléctrico y magnético, no son muy numerosos. Por lo que no se tiene mucha información sobre cómo conceptualizan los estudiantes ambos campos.

Las ideas previas de campo eléctrico y magnético encontradas en estudiantes universitarios, pueden ser agrupadas en las siguientes concepciones¹³⁰:

c1_e. Para que exista un campo eléctrico, debe haber una fuerza actuando sobre una carga. (u2)

c2_e. Un campo eléctrico sólo puede existir si hay cargas en movimiento. (u1, u3, u4)

c3_e. Los campos eléctrico y magnético son energía almacenada en un medio. (u6)

c4_e. Los campos eléctricos son producidos por una carga puntual estática. (u5, u7, u8, u9)

c5_e. Un campo eléctrico o magnético puede ser producido por una corriente eléctrica. (u5, u17)

c6_e. La intensidad del campo eléctrico y/o magnético depende de la carga que lo produce. (u7)

c7_e. La interacción electromagnética entre dos cargas se propaga a la velocidad de la luz. (u9)

c8_e. Si una carga es colocada en un campo eléctrico, éste ejercerá una fuerza sobre ella, ocasionando que se mueva. (u11, u12, u13, u14, u15)

c9_e. La fuerza que ejerce el campo eléctrico, sólo será sentida por la partícula si ésta se encuentra sobre una línea de fuerza. (u10, u11, u12, u13, u16)

c10_e. Las líneas de fuerza describen la trayectoria que cualquier partícula seguiría si fuera situada en las líneas. (u11, u12, u13, u15)

c11_e. La trayectoria de una partícula situada en un campo eléctrico será tangente a la línea de fuerza. (u10)

c12_e. Por cualquier punto de un campo eléctrico se puede hacer pasar una línea de fuerza, de tal forma que una fuerza es ejercida sobre una carga en cualquier punto del campo. (u14, u15)

Las concepciones anteriores dan cuenta de varios tópicos relacionados con los campos eléctricos. Entre ellos están la generación de los campos (c4_e, c5_e), la intensidad de los campos (c6_e) y las líneas de fuerza (c9_e – c12_e).

¹³⁰ El subíndice e indica que las concepciones corresponden al tema de campo eléctrico y magnético.

En investigaciones sobre líneas de fuerza, se ha encontrado que algunos estudiantes consideran las líneas de fuerza como elementos físicos responsables de la transportación de la fuerza del campo (Pocovi, 2002); la cual corresponde a la concepción de Faraday. Las líneas de fuerza son en la mayoría de las veces mal interpretadas por los estudiantes y por lo tanto su aplicación en el análisis de problemas electrostáticos es errónea.

Por otro lado, algunas concepciones establecen una relación entre el campo y la fuerza sobre alguna carga -la cual no es incorrecta-, dejando de lado otros aspectos del campo. El problema reflejado en las concepciones $c1_e$, $c8_e$, es el análisis que se realiza de los fenómenos electrostáticos, basándose en la fuerza entre cargas eléctricas -lo cual no es incorrecto-, sin considerar en absoluto el campo eléctrico. Por lo que cuando no se tiene la interacción entre cargas, no se logra utilizar el concepto de campo eléctrico como en el caso de los dieléctricos o circuitos eléctricos.

Las concepciones anteriores, se agrupan en las siguientes categorías, de acuerdo con su semejanza conceptual:

C1_{u_e}. Las líneas de fuerza ejercen las fuerzas sobre las partículas situadas en un campo eléctrico. ($c9_e$, $c10_e$, $c12_e$)

C2_{u_e}. El campo eléctrico está ligado a las fuerzas ejercidas sobre partículas puntuales. ($c1_e$, $c8_e$)

C3_{u_e}. Los campos eléctrico y magnético están relacionados con cargas en movimiento. ($c2_e$, $c5_e$)

C4_{u_e}. El campo eléctrico es producido por cargas puntuales estáticas. ($c4$, $c6$)

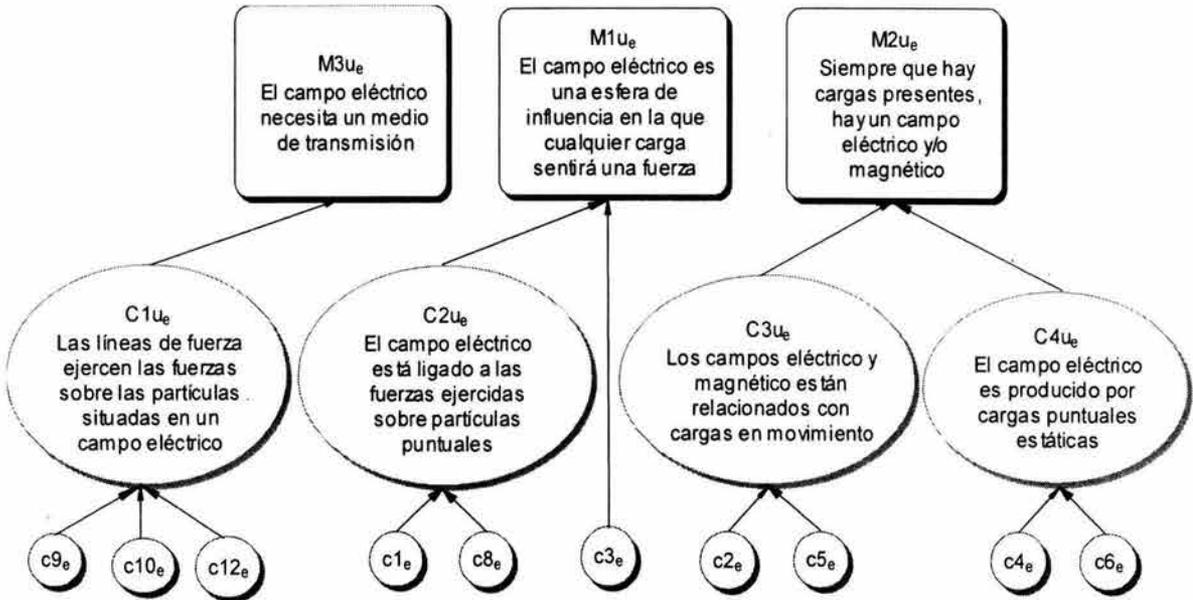
A estas categorías se les pueden asignar los marcos con los cuales se agrupan las ideas previas reportadas.

M1_{u_e}. El campo eléctrico es una esfera de influencia en la que cualquier carga sentirá una fuerza. ($C2_{u_e}$, $c3_e$)

M2_{u_e}. Siempre que hay cargas presentes, hay un campo eléctrico o magnético. ($C3_{u_e}$, $C4_{u_e}$)

M3_{u_e}. El campo eléctrico necesita un medio de transmisión. (C1_{u_e})

Un esquema que representa esta interpretación, es:



Esquema 4. Categorización de las ideas previas de campo eléctrico en universidad

Los dos primeros marcos, corresponden a la relación que establecen los estudiantes entre el campo y las cargas, de tal forma que, siempre que hay un campo debe haber una carga presente, o viceversa. Esta relación entre el campo y las cargas, sugiere la falta de diferenciación entre los conceptos de intensidad de campo y fuerza eléctrica (Furió y Guisasola, 1998b), por lo que al no poder diferenciar entre ambos conceptos, los estudiantes ligan directamente el campo con las fuerzas sobre cargas presentes.

El tercer marco, no corresponde exactamente a la idea de éter que se tenía en el siglo XIX, antes bien, corresponde a que el medio en el que se encuentre el campo, es el que se encarga de transmitir las acción eléctricas y magnéticas. Un ejemplo de esto, es que, las ondas electromagnéticas sean propagadas por el aire. De igual forma, algunos estudiantes, al estudiar las líneas de fuerza, las identifican como transmisoras del campo eléctrico y magnético.

4.4.4. Categorización de las ideas previas de campo eléctrico y magnético en bachillerato

Las investigaciones dedicadas a encontrar las ideas previas que los estudiantes de bachillerato poseen sobre campo eléctrico y magnético, son menos numerosos aún que los del nivel universitario. Por lo que no se tiene mucha información sobre cómo conceptualizan los estudiantes los campos eléctrico y magnético.

Las ideas previas de campo eléctrico y magnético encontradas en estudiantes de bachillerato, pueden ser agrupadas en las siguientes concepciones:

- c4_e.** Los campos eléctricos son producidos por una carga puntual estática. (b1, b2)
- c5_e.** Un campo eléctrico y/o magnético puede ser producido por una corriente eléctrica. (b5)
- c6_e.** La intensidad del campo eléctrico y/o magnético depende de la carga que lo produce. (b4)
- c13_e.** Los campos magnéticos pueden ser positivos o negativos. Los campos de igual signo se repelen y los de distinto se atraen. (b7, b8)
- c14_e.** La atracción eléctrica y magnética necesita aire como su medio conductor. (b3, b11)
- c15_e.** Las fuerzas magnéticas dependen de la distancia entre los imanes. (b9, b10)

De las concepciones anteriores, podemos observar que algunas son comunes a los dos niveles educativos (bachillerato y universidad).

Algunos de los tópicos a los que hacen referencia las concepciones también son comunes, como por ejemplo: la generación de los campos eléctricos y magnéticos (c5_e), intensidad de los campos (c6_e) y la naturaleza de los campos eléctricos y magnéticos (c13_e).

Las concepciones anteriores, pueden ser agrupadas en las siguientes categorías de acuerdo con su semejanza conceptual:

C1b_e. **El campo eléctrico es producido por cargas puntuales.** (c4_e,c6_e)

C2b_e. **Los campos eléctrico y magnético están relacionados con cargas en movimiento.** (c5_e)

De acuerdo con las concepciones anteriores, los estudiantes de bachillerato consideran la presencia de cargas para establecer la presencia de un campo eléctrico y magnético.

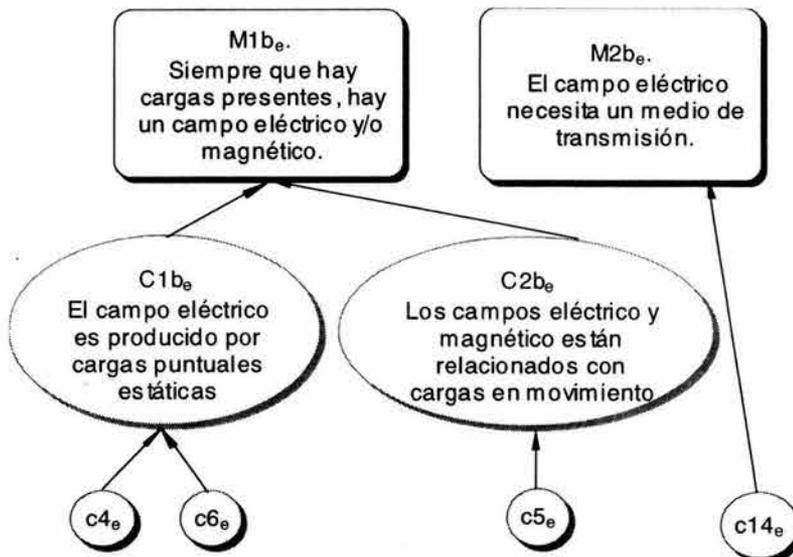
Para establecer los marcos, tomaré en cuenta que tanto las categorías como las concepciones pueden formar parte del esquema realizado para el nivel universitario. Esto debido a que en algunos casos no hay suficientes concepciones o categoría para sustentar un marco.

Las concepciones y categorías anteriores pueden ser agrupadas en los siguientes marcos:

M1b_e. **Siempre que hay cargas presentes, hay un campo eléctrico y/o magnético.**
(C1b_e, C2b_e)

M2b_e. **El campo eléctrico necesita un medio de transmisión.** (c14_e)

Un esquema que representa la interpretación anterior es:



Esquema 4. Categorización de las ideas previas de campo eléctrico en bachillerato

De los marcos anteriores se puede observar que los estudiantes establecen una condición para la existencia de campos eléctrico o magnéticos:

Sólo si hay cargas presentes, ya sea estáticas o en movimiento existirá un campo. Es de notarse, que los estudiantes están familiarizados principalmente con cargas puntuales estáticas, y no con distribuciones de carga. Esto como veremos en el siguiente capítulo, está relacionado a la forma en que los libros de texto presentan el tema de campo eléctrico.

Otro aspecto que resulta de los marcos establecidos, es la necesidad de un medio conductor para la propagación del campo. En el nivel universitario el elemento utilizado por los estudiantes para dicho fin eran las líneas de fuerza, mientras que en este nivel el aire ocupa el lugar de las líneas de fuerza.

En el siguiente capítulo se establecerán las relaciones entre la presentación que los textos hacen de los conceptos de corriente eléctrica y campo eléctrico y magnético, y las ideas previas de los estudiantes, con fundamento en el primer apartado de este capítulo.

5. Análisis del concepto de campo y corriente en diez libros de texto de nivel universitario

Los libros de texto juegan un papel primordial dentro de la educación, en especial dentro de la educación superior. De esta forma, la mayor parte de los conocimientos adquiridos por los estudiantes, tienen como fuente los libros de texto. Sin embargo, la mayoría de las veces los libros de texto no proveen los elementos suficientes para que el alumno comprenda del todo los conceptos, o presentan analogías y modelos que pueden confundir a los estudiantes, antes que ayudarles a comprender los conceptos y estructuras del conocimiento científico.

En este capítulo, se analizarán los conceptos de campo eléctrico y magnético, así como el de corriente eléctrica en algunos libros de texto. Los libros han sido elegidos de acuerdo al plan de estudios de la carrera de Física impartida en la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México; y los aspectos analizados son los considerados relevantes tanto para los profesores como para los estudiantes; es decir, aquellos necesarios para sentar las bases para una visión completa de los conceptos. Aunado a ello, se verá cómo influye cada texto en las ideas previas de los estudiantes. Esto es, si el texto puede ayudar a cambiar las concepciones erróneas de los estudiantes.

5.1. Antecedentes

Los libros de texto, han sido considerados de gran importancia dentro de la enseñanza de los conceptos científicos. Estos son elegidos por los maestros o las escuelas dependiendo de varios aspectos. Uno de estos aspectos, es la visión de enseñanza que posean los profesores o la institución a la que pertenezcan. Esta visión ha evolucionado desde principios de siglo hasta las décadas pasadas.¹³¹

Uno de los aspectos que ha concentrado la atención de los investigadores durante las últimas décadas, son los estudios sobre las ideas previas de los alumnos y el cambio conceptual dada la posición constructivista.

“Este trabajo ha sido enfocado, al menos en términos generales, por teorías constructivistas del aprendizaje: el fundamento racional ha sido la necesidad de entender la naturaleza de las ideas y creencias que los aprendices de todas las edades presentan en el estudio de la física (y ciencia), entender la naturaleza de las ideas (y algunas veces creencias) después de la enseñanza en el salón de clase, y usar dichas ideas para enriquecer la práctica docente.”¹³²

Algunos de los estudios realizados se han enfocado en las ideas previas de los estudiantes en el área de electricidad; en especial de los dos conceptos que trata esta tesis: Campo eléctrico y corriente eléctrica (ej. Viennot & Rainsong, 1992, Furió & Guisasola, 1998b, Dupin & Joshua, 1997).

En algunas investigaciones se ha podido observar que el cambio en el entendimiento de los estudiantes sobre *algunos* conceptos, después de la enseñanza tradicional es apenas perceptible (Fredette & Lochhead, 1980). Esto es, después de tomar los cursos escolares tradicionales, *algunas veces* los estudiantes aun tienen las mismas ideas sobre conceptos como el de corriente eléctrica que poseían antes de tomar el curso.

El problema en la enseñanza de los conceptos de electricidad, tiene varios elementos que pueden ser analizados:

1. Los profesores no tienen seguridad en cuanto a los conceptos que van a enseñar.

¹³¹ DeBoer, G., Scientific Literacy: Another look at its historical and contemporary meanings and its relationship to science education reform.

¹³² Mulhall, P., McKittrick, B. & Gunstone, R., A perspective on the resolution of confusions in the teaching of electricity, p. 575.

2. Los libros de texto son confusos en la presentación de los conceptos.
3. El uso de analogías, metáforas y modelos puede ser no apropiado.

El elemento en el cual se enfoca esta tesis, es en la presentación que hacen los libros de texto universitarios de los conceptos de campo eléctrico y corriente eléctrica; atendiendo a la problemática planteada en los párrafos anteriores.

La enseñanza de la ciencia, en particular de la física, ha sido una enseñanza centrada en los libros de texto. La mayoría de los libros modernos, tratan de crear un vínculo entre el hecho científico y su formulación matemática, dándole mayor énfasis a esta última; en lugar de concentrarse más en la naturaleza y el proceso de la ciencia. Debido a esto, la evaluación está enfocada a la habilidad del alumno en resolver los problemas y en la memorización de las ecuaciones que describen los hechos científicos.

Como resultado de esto, se dejan de lado cuestiones importantes, como el análisis del fenómeno físico, los elementos que le permitieron al científico (por ejemplo, Maxwell) llegar a ciertas ecuaciones, en qué condiciones experimentales son válidas dichas ecuaciones, etc.

Hay que mencionar que los libros de texto, difícilmente dan respuesta a interrogantes como estas, por lo que no ayudan a que el alumno se forme un esquema completo de la teoría a aprender; y a veces los estudiantes no encuentran una relación entre los hechos que observan en su vida diaria y las teorías aprendidas en los libros de texto.

De acuerdo con Kuhn (1962), los libros de texto son "vehículos pedagógicos para la perpetuación de la ciencia normal. Por lo tanto, los científicos aprenden ciencia a través del estudio de la aplicación de una teoría, a un rango concreto de fenómenos naturales y nunca aprenden conceptos, leyes y teorías de forma abstracta y por ellos mismos."¹³³

De aquí, que los libros de texto no sirvan, de acuerdo con Kuhn, para formar pensadores de alto nivel requeridos para examinar los fundamentos de una ciencia; y que la

¹³³ Kuhn, T. The structure of scientific revolutions, p. 187. citado en Stinner, A., Science Textbooks and Science Teaching: From Logic to Evidence, p.3.

enseñanza centrada en los libros de texto prepare en su mayoría, científicos listos para resolver problemas como los de los libros.

El resultado de la educación basada en los libros de texto, tiene como consecuencia una memorización de fórmulas matemáticas, hechos científicos ligados con sus descubridores, y la habilidad para resolver problemas; todo esto, algunas veces sin una comprensión de los conceptos involucrados. Esto lleva principalmente a la falta de interés en la ciencia por parte de los estudiantes de niveles inferiores al universitario y a universitarios de las ciencias e ingenierías.

Aspectos para el análisis de los libros de texto

Con base en lo anterior, los aspectos que serán tomados en cuenta para el análisis de los libros de texto, son los siguientes:

1. Si presentan antecedentes históricos. De ser así, la forma en que los toman en cuenta. En este punto, también se verá los aspectos históricos que son omitidos por el (los) autor (es), y que pueden ser importantes para ayudar a modificar algunas de las concepciones erróneas de los estudiantes. (historia)
2. El tipo de analogías por medio de las cuales son explicados los conceptos, así como el lenguaje utilizado en su descripción. (analogías)
3. Las simplificaciones realizadas por el autor para explicar los conceptos complejos y abstractos. (simplificaciones)
4. Si el trato del tema es cuantitativo, de tal forma que el entendimiento cualitativo queda de lado. (cuantitativo)
5. Si los conceptos sólo se utilizan como una base para resolver problemas de otro tipo. (problemas)
6. La justificación de los conceptos, es decir, si los autores explican porqué son necesarios. Con ello se verá, cuál es su papel dentro de la teoría. (justificación)
7. La articulación de los conceptos. Esto es, si se relacionan los conceptos o son

presentados de forma aislada. (relación)

8. Los aspectos experimentales que apoyan los conceptos. (experimentos)

9. La influencia del texto en las concepciones de los estudiantes. Dentro de este apartado se verá: las concepciones que no pueden ser modificadas con la ayuda del texto , así como las que sí puede ayudar a modificar. Para esta parte del análisis, se tomará en cuenta que la mayor cantidad de ideas previas en el tema de corriente eléctrica, son las reportadas por las investigaciones en estudiantes de bachillerato y la mayor cantidad de ideas previas de campo eléctrico y magnético son las encontradas en estudiantes universitarios, como se mostró en el capítulo anterior. (ideas previas)

El análisis de los nueve aspectos se presenta a continuación para cada uno de los diez textos seleccionados; la palabra entre paréntesis ayudará a identificar cada punto.

5.2. Análisis de los textos universitarios de Física

5.2.1. Presentación

Los primeros tres libros, son de nivel básico, y fueron elegidos bajo la consideración de que su perspectiva es diferente a la de los libros actuales, por lo que representan una alternativa distinta y un punto de comparación con los que serán presentados posteriormente. Los textos son:

- a. Arons, A. (1970) Evolución de los conceptos de la Física, México: Editorial Trillas.
- b. Rogers, E. (1973) Physics for the inquiring mind, EE. UU. : Princeton University Press.
- c. Olenick, R., Apostol, T. & Goodstein, D. (1986) Beyond the mechanical universe, EE.UU.: Cambridge University Press.

El primero de estos tres, está basado en el plan de estudios instituido en el Amherst College en 1947; tiene como objetivo, "desarrollar el conocimiento del estudiante acerca de los fenómenos físicos, los conceptos y las teorías, y también de colocar su contenido técnico ante una perspectiva histórica y filosófica."¹³⁴

El libro está diseñado para un curso introductorio, para estudiantes de Física que planeen tomar más cursos.

El autor hizo énfasis en la física misma, aunque también dio importancia al origen y significado de los conceptos físicos con la intención de que los estudiantes logran la unificación sobre fenómenos aparentemente no relacionados, así como una visión del impacto de la ciencia sobre la historia intelectual, entre otras cosas.

Por lo que respecta a la parte de aplicación, el texto plantea varios problemas de forma explícita con el objetivo de despertar en el estudiante la habilidad de discutir las definiciones de los conceptos, analizar la estructura de las teorías, e identificar otro tipo de elementos que toman parte en la realización de problemas.

El segundo, está dedicado a aquellas personas que no saben Física, pero que desean aprender y entenderla. Corresponde a un curso de un año, dedicado a estudiantes de otras carreras distintas a la Física, de la Universidad de Princeton. Por esta razón, las herramientas tanto de la matemática como de la geometría necesarias para la lectura del texto, son mínimas.

En el prefacio de la edición, el autor declara que los problemas son una parte importante del curso, debido a que estos llevan como objeto que el lector discuta, razone y pule su propio conocimiento. De acuerdo con el autor, si el lector desea establecer un vínculo entre la parte experimental y la teoría, necesita razonar y pensar por sí mismo.

Uno de los objetivos, es mostrar al lector, a través de los distintos bloques, que la ciencia es un conjunto, es decir, que las distintas partes de la Física se relacionan entre sí. Por lo tanto, el texto pretende ligar un capítulo con otro, de tal forma que la información lleve a explicaciones completas. La filosofía e historia de la ciencia, se incluyen en el texto, por

¹³⁴ Arons, A., Evolución de los conceptos de la Física, p. 5.

considerar el autor que estas dos ramas constituyen la esencia de la ciencia.

En el último, los autores intercalan ejemplos y preguntas a lo largo del texto, ya que consideran que es importante que los estudiantes realicen un esfuerzo mental, hacer y responder preguntas, y resolver problemas. De esta forma, los ejemplos y preguntas intercaladas en el texto, pretenden ser parte esencial del proceso de aprendizaje. También la historia es una parte importante del texto, ya que es utilizada con el objetivo de humanizar la física. Por lo que, no es un objetivo el que los estudiantes memoricen nombres y fechas.

Los cuatro libros siguientes, corresponden a los sugeridos en el temario de la Facultad de Ciencias para el curso de Electromagnetismo I, del nuevo plan de estudios.

Los libros básicos sugeridos, son:

- d. Lorrain, P. & Corson, D. (1990) Electromagnetism: Principles and applications. Nueva York: W. H. Freeman and Company.
- e. Purcell, E. (1985) Berkeley Physics Course, vol. 2 Electricity & Magnetism. Estados Unidos: McGraw Hill.

El primero de estos tiene como objetivo proporcionar a los estudiantes el conocimiento para trabajar, es decir, las herramientas necesarias para que los estudiantes se enfrenten a problemas (tanto los presentados por el texto, como aquellos concernientes al área laboral). Para ello, presenta las ideas y los problemas necesarios para aplicarlas, de tal forma que ninguna idea se quede sin uso. Asimismo, el texto está diseñado para que los estudiantes puedan utilizarlo en un curso auto-didacta, y que al final de éste puedan enfrentarse a situaciones reales, aplicar el conocimiento adquirido en otras disciplinas y estimular su creatividad.

El segundo, es un libro que trata de presentar la física elemental tal y como es utilizada por los físicos en su trabajo diario. Además de enfatizar los elementos de la física. Asimismo, menciona que tiene un enfoque microscópico de los fenómenos eléctricos y magnéticos en la materia. Cuenta con suficiente espacio dedicado a la exposición de los temas, equilibrándola con la formulación matemática (aunque en algunos casos, alguna

de las dos -la formulación matemática o la exposición- ocupa el primer lugar).

Los textos de apoyo o complementarios sugeridos por el programa, son:

- f. Halliday, D., Resnick, D. & Krane, K. (1996) Física vol. 2. México: Compañía Editorial Continental.
- g. Alonso, M. & Finn, E. (1998) Física vol. II Ondas y Campos. México: Addison-Wesley Iberoamericana.

Ambos libros son introductorios y semejantes en la forma de exposición. El primer texto (Halliday, D., et. al.) ofrece una introducción a la física estricta y completa, procurando indicar el límite de ciertos argumentos particulares, animando a los estudiantes a cuestionarse sobre la validez de los resultados obtenidos en ciertas situaciones, y lo que sucede con los límites relativistas.

El segundo (Alonso, M., et. al.), tiene como objetivo presentar ideas fundamentales, haciendo énfasis en las leyes de conservación, en los conceptos de campos y ondas y en el punto de vista atómico de la materia (esto último, es también uno de los objetivos del libro *Electricity & Magnetism*, Purcell, M.) El libro fue diseñado a manera de un texto introductorio, a fin de utilizarse en los primeros semestres de la licenciatura.

Aunado a los libros ya mencionados, se eligió un libro, escrito por un autor mexicano, y que tiene el mismo nivel (introductorio) que los anteriores:

- h. Riveros, H. (1998) *Electricidad y Magnetismo*. México: Editorial Trillas.

Es importante mencionar que el libro anterior, tiene un formato de preguntas y respuestas que difiere totalmente al formato de los demás libros seleccionados. De igual forma, es el único que expresa de manera explícita la necesidad de utilizar los preconceptos de los estudiantes como una herramienta para el curso. El formato de preguntas y respuestas

responde a la idea de que "sólo se aprende lo que uno mismo construye."¹³⁵ El autor sugiere que, inmediatamente después de leer cada pregunta, el alumno la conteste con los conocimientos que ya tiene y/o determine las herramientas que le hacen falta para contestar y las fuentes a las que puede recurrir para hacerlo. De esta forma, las repuestas brindadas por el autor, sólo servirán como una confirmación a las generadas por el estudiante. Uno de los objetivos del libro es, por tanto, recurrir a los preconceptos de los estudiantes, para que el profesor determine el curso a seguir en la dinámica de clase.

Dos libros más seleccionados para el análisis, fueron los sugeridos por el programa de la Facultad de Ciencias, correspondiente a la materia de Electromagnetismo II, del nuevo plan de estudios. El curso de Electromagnetismo II, tiene como objetivos: destacar la descripción matemática unificada de los fenómenos eléctricos y magnéticos, en el vacío y en medios materiales, así como reconocer las propiedades dinámicas del campo electromagnético incluyendo las leyes de conservación correspondientes, como consecuencia de las leyes del campo y de las relaciones constitutivas, entre otros. Tomando en cuenta estos objetivos, y el hecho de que el curso no es introductorio, no debemos esperar que los textos enfatizen los conceptos de campo electromagnético y corriente eléctrica, pero sí que refuercen los conceptos adquiridos previamente por el alumno. Los textos elegidos en este nivel para analizar, son:

- i. Reitz, J., Milford, F. & Christy, R. (1996) Fundamentos de la teoría electromagnética (4^a ed.). Estados Unidos: Addison-Wesley Iberoamericana.
- j. Vanderlinde, J. (1993) Classical Electromagnetic Theory. Estados Unidos: John Wiley & Sons.

El primero de ellos (Reitz, J., et. al.), presenta la electricidad y el magnetismo a partir de las leyes experimentales básicas, debido a que el texto no es de carácter introductorio. Los problemas forman parte importante del material, debido a la preocupación por parte de los autores de acortar la brecha entre el desarrollo formal del tema y los problemas

¹³⁵ Riveros, H., Electricidad y Magnetismo, p.5.

enunciados.

El segundo (Vanderlinde, J.), está diseñado para estudiantes que ya han tomado cursos anteriores de electricidad, por lo que los primeros cuatro capítulos son presentados a manera de repaso. Las teorías de electricidad y magnetismo son desarrolladas en paralelo, enfatizando siempre la relación entre ambas teorías. Se trata al igual que se hace en *Electromagnetism: Principles & Applications* (Lorrain, P., et. al.) de que todos los conceptos presentados sean utilizados en ejemplos y problemas, procurando que no sea un libro más matemático que físico.

Es importante tomar en cuenta las características de los textos al realizar el análisis, y relacionar las ideas previas ya mencionadas en el capítulo anterior con los contenidos de los textos.

5.2.2. Evolución de los conceptos de la Física, Arons, A.

El estudio de los campos eléctrico y magnético, está dividido en dos partes. La primera corresponde a un capítulo en el que el autor introduce los conceptos de forma cualitativa, y en el segundo capítulo lo hace de forma cuantitativa. A continuación, haré un reseña de la forma en que presenta los conceptos de campo eléctrico y magnético el capítulo de leyes y relaciones cuantitativas, para analizar el capítulo correspondiente a la explicación cualitativa en el punto 1 (historia).

El segundo capítulo, introduce las ecuaciones del **campo eléctrico**, de la siguiente manera:

“Si en una región dada del espacio encontramos que una fuerza eléctrica actúa sobre una partícula cargada, decimos que existe un campo eléctrico en esa región... Si la partícula de prueba lleva una pequeña carga q_t , esperaríamos que la magnitud de la fuerza en **P** sea proporcional a q_t , este hecho puede confirmarse experimentalmente.”¹³⁶

¹³⁶ Arons, A., *Evolución de los conceptos de la Física*, p. 573.

Se establece entonces, que \mathbf{E} es una cantidad vectorial asociada únicamente con el efecto eléctrico en el punto \mathbf{P} e independiente del objeto de prueba que se use, siempre que su carga sea pequeña para que no altere la distribución de carga original.

Los ejercicios que siguen a la ecuación de campo eléctrico están enfocados al cálculo del campo eléctrico en un punto \mathbf{P} cercano a un arreglo de cargas estáticas.

De acuerdo con Arons, el **campo magnético** podría ser introducido de manera análoga al campo eléctrico, sin embargo, dados los antecedentes históricos citados en un capítulo anterior, no hay un concepto que corresponda al de carga magnética. Tampoco puede transferirse carga magnética de un cuerpo a otro, ni ser dividida. Es por estas razones y algunas otras más, que la forma más sencilla de definir el campo magnético, es en términos de la fuerza sobre un alambre portador de corriente debido a un campo magnético, en lugar de hacerlo en términos de la fuerza sobre el polo de la aguja de una brújula. En consecuencia, se dedica a describir la forma en que se puede medir la fuerza sobre una sección de alambre portador de corriente colocado en un campo magnético.

Después de encontrar que la fuerza ejercida por el campo es proporcional a la densidad de flujo magnético, a la corriente eléctrica que circula por el alambre y a la longitud del cable, se introduce la inducción magnética como una cantidad vectorial. Lo anterior, obedeciendo a la necesidad de observar que el campo magnético, al igual que el eléctrico es una cantidad vectorial.

La **corriente eléctrica** se introduce de manera similar a los campos eléctrico y magnético, esto es, haciendo referencia a la forma en que se experimentó en el pasado con conductores y con la electricidad.

A pesar de que el autor dedica mucho tiempo a la descripción de los experimentos y momentos que considera de gran importancia, ya que fueron en los que se registraron mayores avances en la teoría de la corriente eléctrica; *no se detiene a dar una definición o a establecer el modelo de corriente eléctrica* que se usa actualmente o el que considerará como "válido" para basar en él la teoría expuesta en el texto. Sin embargo, a lo largo del capítulo va estableciendo algunas de las condiciones necesarias para la corriente eléctrica, como es la diferencia de potencial mantenida por la batería, que hace que la carga sea desplazada continuamente alrededor de un circuito.

Cabe hacer notar, que en los primeros apartados del capítulo, el autor no menciona cuáles son las cargas que son desplazadas por el campo; sino que es hacia el final del mismo que establece la convención de que las cargas positivas son arrastradas por el campo.

En los nueve puntos siguientes queda condensado el análisis del texto.

1. (historia) El capítulo que describe el concepto de campo cualitativamente, comienza narrando la situación en la que se encontraba la ciencia en el siglo XVII y su evolución hacia el XVIII. El autor menciona cómo el siglo XVII se caracterizó por la desacreditación de las propiedades ocultas de los sistemas físicos al mismo tiempo que fueron reemplazadas por la matematización.

Después de esto, se consideran los descubrimientos de Galvani y Volta. Dentro de la descripción del trabajo de Volta, se citan las consideraciones de éste sobre los efectos observados en el nervio de la rana:

"Estoy convencido de que el fluido eléctrico nunca es excitado y puesto en movimiento por la misma acción de los órganos, o por alguna fuerza vital o extendida para ser llevada de una parte del animal a otra,"¹³⁷

En el párrafo anterior, se puede observar que Volta se refiere a la corriente eléctrica como un **fluido eléctrico**. El primer arreglo que el científico realizó, y que funcionaba como batería es descrito detalladamente, así como la forma en que detectó el flujo de electricidad. La exposición del descubrimiento de Volta, no sólo se queda ahí, sino que también se hace referencia a las consecuencias de la pila, como es el fenómeno de electrólisis del agua.

El recorrido histórico queda complementado con la descripción de cómo un par de placas cargadas, cada una con carga opuesta a la otra, son descargadas lentamente, mediante una esfera conductora que transporta las cargas positivas hacia la placa negativa, y viceversa. Haciendo referencia a esta experiencia y al descubrimiento de Volta, el autor menciona que:

"Experimentos tales como los descritos anteriormente nos llevan a hablar de "circuitos" y del flujo

¹³⁷ Arons, A., Evolución de los conceptos de la Física, p. 540.

de "corrientes eléctricas estacionarias". Presentan una relación clara entre los fenómenos estáticos asociados con la electricidad por fricción y el contexto evidentemente distinto, representado por la pila voltaica ... El mecanismo de conducción es muy diferente para diferentes situaciones físicas y con diferentes materiales; en realidad, el mecanismo está íntimamente relacionado con la estructura eléctrica microscópica de la materia."¹³⁸

Así, el objetivo principal es hacer notar al lector la diferencia entre los fenómenos eléctricos estáticos y los dinámicos, establecer una relación entre la corriente eléctrica y las propiedades de la materia, así como los distintos tipos de corriente eléctrica, dependiendo del fenómeno físico.

El autor narra el experimento con el que Oersted demuestra la relación entre la electricidad y el magnetismo, así como los resultados observados por Ampère sobre la atracción y repulsión de cables por los que circula corriente en la misma dirección en el primer caso y en distinta dirección en el segundo caso. En esta parte, se muestran formas en las que el estudiante puede saber la dirección del campo magnético, dependiendo de la dirección de la corriente eléctrica (regla de la mano derecha), detalles sobre el trabajo de cada científico, así como el análisis de los resultados obtenidos por cada uno de ellos. Hacia el final del capítulo, se menciona brevemente el trabajo de Arago que demostró que el hierro puede ser magnetizado débilmente cerca de un conductor portador de corriente.

Antes de llegar al concepto de campo, se hace referencia al trabajo de Faraday así como su crítica a la acción a distancia. Lo más importante, de acuerdo con Arons, es la importancia de los descubrimientos experimentales y las especulaciones teóricas de Faraday, quien rechazando la acción a distancia, asignó a las líneas de fuerza la propiedad de propagar las acciones eléctricas y magnéticas. De esta forma, Faraday estableció la base para el concepto de campo, que fue elaborado matemáticamente por Maxwell. En esta parte del texto, se reseña el proceso que llevó a Faraday a considerar la existencia de un éter, y la asignación de la función del éter a las líneas de fuerza. Hay que recordar que Faraday consideraba que las acciones eléctricas y magnéticas necesitaban ser propagadas por algún agente material.

¹³⁸ Arons, A., Evolución de los conceptos de la Física, p. 543.

El concepto de campo se presenta como una consecuencia del trabajo de Faraday, William Thomson y Maxwell. La contribución de Faraday fue la idea de las líneas de fuerza, como entidades existentes físicamente; Thomson puso especial atención a las analogías matemáticas existentes entre la teoría sobre el flujo de un fluido, el flujo de calor y la electricidad, y, la electrostática y el magnetismo. Por último, Maxwell se dedicó a sintetizar en una sola teoría los fenómenos conocidos de la electricidad y el magnetismo. El capítulo cierra con la visión de Maxwell sobre los fenómenos eléctricos y magnéticos.

A través de la presentación histórica, el autor enfatiza la forma que Faraday trató el problema de la acción a distancia, dando al éter la propiedad de transmitir las acciones eléctricas y magnéticas, aunque, no menciona cómo fue que esta idea del éter fue eliminada.

Ahora bien, en el capítulo de corriente eléctrica, el autor se vale de los experimentos de Cavendish, Davy, Ohm, Joule y Faraday para mostrar el modo en que contribuyeron a la formación de la teoría de corriente eléctrica. Entre las investigaciones más destacadas se encuentran:

- Las investigaciones de Davy y Ohm sobre la conducción en metales. En estas investigaciones, sobresale la relación de la resistencia eléctrica y la intensidad de corriente eléctrica,
- El experimento de Joule para encontrar la relación entre la resistencia y la intensidad de corriente producida en los alambres de un circuito.
- La matematización de la relación entre la corriente, el voltaje y la resistencia en un circuito eléctrico por parte de Ohm.
- Los experimentos sobre la electrólisis que realizara Faraday.

En el recuento histórico no se incluye la introducción del electrón a la teoría electromagnética, la cual le quitó el carácter de fluido a la corriente para constituirlo en un fenómeno no continuo.

Es de notarse, que las experiencias narradas por el autor, dan al estudiante un panorama amplio de la forma en que estos científicos llegaron a las conclusiones que constituyeron

sus teorías, así como la forma en que evolucionaron las relaciones entre resistencia e intensidad de corriente, dependiendo de los materiales, temperatura, etc.

En algunas ocasiones se detallan los problemas o el razonamiento que siguieron los científicos para consolidar las observaciones y teoría que describe los circuitos eléctricos; centrando la exposición del tema en estos.

Aunado a esto, el autor utiliza el término **flujo** para referirse a la corriente eléctrica - aunque el autor, no se refiera con la palabra flujo a la corriente como un fluido, los estudiantes lo pueden interpretar así-.

2. (analogías) El autor no utiliza analogías en la exposición de los conceptos.

3. (simplificaciones) Como hemos visto, el campo es presentado en dos capítulos; uno se encarga de desarrollar el concepto de manera cualitativa, y el otro cuantitativamente. A pesar del desarrollo cualitativo realizado en el primer capítulo, al pasar al siguiente capítulo, no se considera todo lo que se habló sobre la historia del concepto, las dificultades con las que se encontraron los científicos y los experimentos y descubrimientos que le dieron forma a la teoría electromagnética; y se expresa al campo como una región del espacio en la que una partícula cargada siente una fuerza eléctrica. Esto puede interpretarse como una falta de articulación entre los dos capítulos. Sin embargo, como el autor no retoma ninguno de los aspectos históricos, y toma como base la definición ya citada, lo consideraré como una simplificación.

En cuanto a la corriente eléctrica, el autor simplifica la teoría al no explicar varios aspectos como el modelo de conducción eléctrica, el modelo utilizado para la descripción del movimiento de las partículas portadoras de carga, el porqué las partículas portadoras son las positivas y no las negativas, etc. De esta forma, la corriente eléctrica queda reducida a la Ley de Ohm.

4. (cuantitativo) Aunque el autor trata de introducir el concepto de campo de forma cualitativa, de tal forma que al establecer las ecuaciones, el estudiante tenga los antecedentes necesarios -los experimentos que llevaron a ellas, así como las condiciones

en las que se encontraban los científicos y las herramientas tanto matemáticas como tecnológicas con las que disponían-, no lo logra, ya que, las secciones en la que trata el tema de forma cualitativa y cuantitativa quedan como dos temas o aspectos diferentes de la misma teoría. El tema es analizado desde el aspecto cualitativo y cuantitativo de manera independiente.

En cuanto a la corriente eléctrica se refiere, hemos visto que se hace una exposición de distintos experimentos que llevaron al conocimiento del comportamiento de los circuitos eléctricos, en los cuales interviene la corriente eléctrica. Sin embargo, no se brinda especial atención a la evolución del concepto de corriente como tal, ni se da una definición matemática del concepto, por lo que se limita a dar las ecuaciones que describen el comportamiento de los circuitos eléctricos. Como consecuencia de ello, el trato es meramente cuantitativo.

5. (problemas) En el capítulo que trata los campos eléctrico y magnético de forma cuantitativa, se proponen problemas para el lector, después de haber establecido las ecuaciones que ayudarán a resolverlos. En el caso del campo eléctrico, los problemas van desde calcular la fuerza que ejerce un campo eléctrico en una partícula cargada, hasta demostrar cómo se comporta el campo de una superficie plana uniformemente cargada. A diferencia de lo anterior, en la sección de campo magnético sólo se presenta un problema.

Cabe mencionar que los problemas propuestos responden a una aplicación inmediata de las ecuaciones utilizadas para exponer los temas, y en algunos casos, complementan ejemplos resueltos por el autor.

En el tema de corriente eléctrica, se pasa rápidamente de los antecedentes históricos a la resolución de problemas. Dichos problemas, corresponden al cálculo de resistencias y corrientes en circuitos en serie y en paralelo, así como el establecer las ecuaciones para sumar resistencias en cada arreglo.

6. (justificación) A pesar de que el capítulo en el que se hace el recuento de la evolución de la teoría electromagnética es amplia y detallada, no se resalta de manera especial

cómo fue que los experimentos contribuyeron al cambio en la concepción del campo de cada científico; y su importancia en el desarrollo de la teoría electromagnética. Lo anterior queda plasmado en el párrafo con el que el autor termina el capítulo:

"La aceptación general de la teoría de Maxwell hacia el final del siglo XIX marcó la transición de una era dominada por la filosofía de acción a distancia a la era presente de las teorías de campo. Nuestra descripción cuantitativa de los fenómenos eléctricos y magnéticos en el próximo capítulo, será conducida, por tanto, en el vocabulario de los "campos"."¹³⁹

Aunque el autor adopta el vocabulario de los campos para su próximo capítulo, no indica, cuál es la importancia de considerar un campo eléctrico o magnético, y basar el resto de la exposición en ellos.

En cuanto al concepto de corriente eléctrica, su inclusión en el texto no es explicada; antes bien, se ve como una herramienta para la resolución de problemas de circuitos eléctricos. Esto se deja ver, desde la introducción en donde se refleja que el principal problema de los científicos no era investigar el fenómeno de la corriente por sí mismo, sino cómo relacionar la intensidad de corriente eléctrica con el tipo de material conductor, el tipo de batería, etc.

7. (relación) En el capítulo en el que se describen los campos magnético y eléctrico de forma cualitativa, el autor establece una relación entre estos dos y la corriente eléctrica. Esta relación la hace evidente de distintas formas. Una de ellas es que el movimiento de las cargas depende de la existencia de un campo eléctrico establecido por una pila. Otra, es la que une un campo magnético con una corriente eléctrica; esto se refleja en el descubrimiento de Oersted, la experiencia de Ampère sobre la atracción o repulsión de los cables conductores de corriente eléctrica, y el comportamiento del solenoide como un imán. Dentro de las explicaciones de cada fenómeno, se señala claramente cómo intervienen la corriente y el campo eléctrico.

8. (experimentación) En los puntos anteriores, se han mencionado algunos de los experimentos que el autor utiliza para apoyar la presentación de los conceptos. Algunos de ellos son:

¹³⁹ Arons, A., Evolución de los conceptos de la Física, p. 570.

- La desviación de la aguja de una brújula debido a la presencia de un campo magnético generado por una corriente eléctrica.
- La fuerza ejercida por un campo magnético sobre un cable portador de corriente.
- La atracción y/o repulsión entre dos cables por los que circula corriente. (Experimento de Ampère)
- La alineación de la limadura de hierro debido a la presencia de un campo magnético. Para este ejemplo, se utilizan distintos arreglos de imanes, así como de alambres por los que circula corriente.
- Patrones que forman semillas de pasto que flotan sobre aceite, bajo la influencia de fuerzas electrostáticas.
- El experimento de Joule, en el que se observa la producción de calor en alambres por los que circula corriente eléctrica.

Estos experimentos son expuestos detalladamente e ilustrados gráficamente. Es importante observar que las actividades son fácilmente reproducibles, lo cual es una ventaja, ya que tanto los estudiantes como los profesores pueden utilizarlas en el aula.

9. (ideas previas) En primer lugar, nos enfocaremos a las concepciones de **campo eléctrico y magnético** presentes en los estudiantes. Algunas que difícilmente pueden ser cambiadas con la presentación que hace Arons, son:

c1. Para que exista un campo eléctrico, debe haber una fuerza actuando sobre una carga.

c8. Si una carga es colocada en un campo eléctrico, éste ejercerá una fuerza sobre ella, ocasionando que se mueva.

El texto podría ayudar a cambiar las concepciones anteriores si mostrara diversas situaciones en las que se puede señalar la presencia de un campo eléctrico, lo cual daría a los estudiantes otro concepto de campo eléctrico y les ayudaría a dejar de considerarlo sólo como un lugar en donde una partícula siente una fuerza actuando sobre ella.

c9. La fuerza que ejerce el campo eléctrico, sólo será sentida por la partícula si esta se

encuentra sobre una línea de fuerza.

c10_e. Las líneas de fuerza describen la trayectoria que cualquier partícula seguiría si fuera situada en las líneas.

c11_e. La trayectoria de una partícula situada en un campo eléctrico será tangente a la línea de fuerza.

c12_e. Por cualquier punto de un campo eléctrico se puede hacer pasar una línea de fuerza, de tal forma que una fuerza es ejercida sobre una carga en cualquier punto del campo.

En el punto 1 del análisis, se puede observar que Arons hace una reseña bastante amplia sobre el trabajo de Faraday, así como de la concepción que tenía sobre las líneas de fuerza como transmisoras o mediadoras de las acciones eléctricas y magnéticas.

Una vez que se ha realizado esta reseña, no se indica la forma en que se vieron modificadas estas concepciones, antes bien, termina el capítulo con la concepción de Maxwell sobre el campo, la cual es similar a la poseída por Faraday. Lo anterior impide que la exposición del tema ayude a modificar las concepciones c9_e - c12_e.

Ahora bien, algunas de las concepciones que el texto puede ayudar a modificar, son:

c2_e. Un campo eléctrico sólo puede existir si hay cargas en movimiento.

c4_e. Los campos eléctricos son producidos por una carga puntual estática.

Como señalé en el punto 1 del análisis, Arons, establece claramente la existencia de dos tipos de fenómenos eléctricos: los estáticos y los dinámicos. También da algunos ejemplos de cada uno, indicando cuáles son las condiciones bajo las que se llevan a cabo. Utilizando esta exposición, y haciendo énfasis en ella, un profesor puede ayudar a modificar las concepciones citadas.

En el tema de **corriente eléctrica**, las concepciones presentes en los estudiantes forman marcos a través de los cuales los alumnos analizan los circuitos eléctricos. Dichos marcos corresponden a los modelos utilizados para analizar los circuitos eléctricos. Los siguientes

marcos registrados en la categorización de las ideas previas de corriente eléctrica - sección 5.4.1.- no pueden ser modificados con el tratamiento que Arons hace del tema:

M1b. La corriente sale de ambos polos de la batería y es gastada o transformada por los elementos del circuito.

M2b. Parte de la corriente que sale de la batería es gastada por los elementos del circuito por lo que menos corriente regresa a la batería.

En el texto *Evolución de los conceptos de la Física*, no se establece de manera formal, un modelo que sirva para analizar los circuitos eléctricos; solamente se mencionan algunos de los elementos necesarios para que se lleve a cabo el fenómeno, como la generación de la corriente por la presencia de la batería. Por lo tanto, al leer el texto, los estudiantes no contarán con un modelo que les lleve a cuestionar el suyo, eliminando la posibilidad de acercarse a un modelo de corriente correcto desde el punto de vista científico.

Una de las concepciones que está incluida dentro de ambos marcos y que a través de estudios ha demostrado ser resistente al cambio (a. Borges, A. & Gilbert, J., 1999), corresponde a:

c1. La corriente es un flujo de electrones.

La consideración de la corriente eléctrica como un fluido se encuentra presente en la mayoría de los estudiantes y es de las más resistentes al cambio. Esta concepción se ve apoyada por el texto, mediante varias situaciones. La primera, es el uso continuo de la palabra **flujo**¹⁴⁰ para referirse a la corriente eléctrica. La segunda es el reporte que hace el autor, sobre la concepción de corriente que sostuvieron distintos científicos como es el caso de Volta. En estas concepciones se habla de la corriente eléctrica como un fluido, un flujo de electricidad.

¹⁴⁰ El autor puede no referirse a un fluido cuando habla de un flujo de electrones para referirse a la corriente eléctrica, pero los estudiantes pueden considerarlo como un fluido.

5.2.3. Physics for the inquiring mind, Rogers, E.

Antes de presentar el tratamiento que hace el autor sobre los conceptos de corriente eléctrica y campo eléctrico y magnético, es importante mencionar que, a diferencia de todos los textos analizados, el autor expone los circuitos eléctricos y con ellos la corriente eléctrica, antes del campo eléctrico y magnético. Es por esta razón, que seguiré el orden propuesto por el autor, de forma tal, que el análisis condensado en los nueve puntos, tomen en cuenta este orden en la exposición.

El capítulo de circuitos eléctricos está escrito, con el fin de que el estudiante lea las descripciones de los experimentos y los lleve a cabo por su cuenta. Principia con los primeros fenómenos eléctricos -obtención de cargas mediante la frotación-, aunque sugiere comenzar el estudio con fenómenos modernos.

El autor toma en cuenta el conocimiento que el lector haya obtenido de sus experiencias diarias con los autos y el alumbrado eléctrico.

Introduce una serie de fenómenos, como son la conexión en serie, los efectos químicos que produce la corriente en agua y una solución de sulfato de cobre, y la propiedad de un cable enrollado en forma de bobina -como lo hicieron Oersted y Ampère- de magnetizar el hierro; cuyo objetivo es introducir la **corriente eléctrica**, ya que gracias a estos fenómenos, los científicos se dieron cuenta de que algo sucedía en el interior de un circuito eléctrico, y los términos que utilizaron para definir el fenómeno son utilizados hoy en día, aunque no con el mismo significado:

"Entonces, se imaginaron una cosa misteriosa, electricidad, fluyendo alrededor del circuito. Su nombre para este flujo, "corriente eléctrica",... lo hemos guardado. No debió haber nada fluyendo realmente; entonces las palabras "corriente" y "flujo" pudieron haber sido perjudiciales, haciendo que el pensar con claridad se volviera difícil. Nosotros sabemos que hay un flujo, de electrones negativos usualmente;.... No se tiene evidencia de tal flujo real,..."¹⁴¹

Una vez que el autor ha aclarado la forma en que se utilizan los términos de flujo y corriente eléctrica, expone la analogía entre el flujo de agua y la corriente eléctrica. El uso

¹⁴¹ Rogers, E., Physics for the inquiring mind, p. 504.

de esta analogía se detallará en el punto 2 del análisis.

Siguiendo con la exposición de los efectos de la corriente eléctrica, se presentan experimentos que hacen al estudiante observar cómo se comporta la corriente en diferentes puntos de un determinado circuito, cómo se calienta un cable en un circuito al aumentar la corriente, etc. Haciendo uso de lo anterior, se describe la corriente y se ve la necesidad de medir la corriente por medio de alguno de estos efectos.

Una vez que se han descrito los efectos de la corriente así como algunos experimentos que pueden ayudar a darse cuenta de todas las propiedades descritas, se encarga de describir el flujo de las cargas:

"Llamamos a lo que fluye alrededor de un circuito "electricidad" un nombre de hace treinta años... Ahora decimos que la corriente es un flujo de carga¹⁴². En esta discusión no explicaremos lo que es la carga, excepto que es algo que fluye cuando una corriente ocurre."¹⁴³

Ampliando la explicación anterior se tiene que:

"Podemos decir vulgarmente que un coulomb es un montón de electrones, un gran número de estas pequeñas cargas eléctricas... Como un retrato crudo -peligroso porque describe detalles que no podemos observar experimentalmente- nos imaginamos algunos electrones andando por ahí perdidos como las moléculas de un gas. Los electrones colisionan raramente con los átomos del metal (los cuales se encuentran ancladas a sus latices cristalinos, pero vibran con algo de energía calorífica). Cuando la corriente fluye, los electrones "perdidos" son conducidos a lo largo del cable por el campo eléctrico... Ganan un poco de energía cinética, pero en promedio la pierden otra vez en colisiones con los átomos del metal."¹⁴⁴

Este modelo de conducción nos indica la forma en la que se comportan los electrones dentro de un conductor, así como que su movimiento se debe al campo eléctrico presente. A este proceso, se añade la relación entre la energía y los portadores de carga en un circuito eléctrico:

"Las hordas de electrones de Coulomb... salen de la batería bien provistas con una energía potencial que reciben vía el campo eléctrico y la gastan conforme se mueven alrededor del circuito. Pasan rozando difícilmente a través de los delgados cables, pagando una parte de energía por esa parte del viaje. En cables de menor conductividad se empujan en el terreno con dificultad...dejando a los átomos del cable vibrando violentamente con calor extra. En cables más delgados la multitud de electrones debe moverse más rápido, para la misma corriente, ganando y perdiendo más energía cinética; por lo tanto hay más calentamiento...Finalmente, se deslizan de vuelta hacia el interior de la batería, la cual utiliza suplementos químicos para darles una nueva ración de energía

¹⁴² El autor no se refiere con el término flujo de carga, a un fluido; sin embargo, los estudiantes pueden considerarlo así.

¹⁴³ Rogers, E., *Physics for the inquiring mind*, p. 510.

¹⁴⁴ *Ibidem*, p. 511.

para que hagan otro viaje."¹⁴⁵

La descripción provista sobre la forma en que la energía es manejada en un circuito eléctrico, corresponde a uno de los modelos utilizados por estudiantes de primaria; aunque, claro está, de forma simplificada. En él describen cómo los electrones salen de la batería, dan la vuelta al circuito y regresan para que la batería les de energía y salgan de nuevo (Summers, M., et. al., 1998).

El **campo eléctrico** es introducido a partir de las cargas en reposo. Un fenómeno en el cual se involucran cargas en reposo, es un circuito abierto, en el que no se ha generado una corriente eléctrica; pero, en el instante en el que se agrega una batería, "corrientes momentáneas fluyen"¹⁴⁶. En los extremos del circuito se colocan unas placas de metal -un capacitor-, las cuales se pueden mover libremente, y después de un rato, se atraerán. Otro ejemplo utilizado es el de cargar objetos por fricción. Las situaciones anteriores y la Ley de Coulomb son los temas que preceden a la presentación del campo eléctrico:

"Pensamos en cada carga como poseedora de un campo eléctrico, así como el campo gravitacional de una masa. Definimos la intensidad de un campo eléctrico en cualquier punto como la fuerza en un coulomb de prueba situado ahí.... La intensidad del campo eléctrico es igual a la fuerza sobre una pequeña carga de prueba, entre el tamaño de la carga de prueba."¹⁴⁷

La intensidad de campo eléctrico es un vector. Así como tamaño, el campo tiene la dirección de la fuerza que actúa sobre una carga de prueba positiva. Las *líneas de fuerza* son aquellas que sirven para hacer un mapa de la dirección del campo, y que "muestran la dirección del campo; esto es, la dirección de la fuerza resultante en una carga de prueba. Son curvas porque la carga de prueba está empujada por una carga principal +Q y jalada por la otra -Q con fuerzas que cambian en dirección y tamaño de un lugar a otro."¹⁴⁸

De acuerdo con el autor, la importancia de las líneas de fuerza radica en lo siguiente:

"La mayoría de los científicos no piensan en términos de una misteriosa "acción a distancia" -fuerza de gravedad o atracción eléctrica, brincando instantáneamente a través del espacio vacío para actuar en una víctima. En lugar de eso, vemos los efectos siendo llevados por un campo (gravitacional o eléctrico). Cambios en la fuerza viajan conforme el campo cambia con velocidad

¹⁴⁵ Rogers, E., Physics for the inquiring mind, p. 513.

¹⁴⁶ Ibidem, p. 533.

¹⁴⁷ Ibidem, p. 543.

¹⁴⁸ Ibidem, p. 544.

definida."¹⁴⁹

Las características que el autor da sobre las líneas de fuerza, son en términos del pensamiento realista de Faraday -hay que recordar que Faraday consideraba a las líneas de fuerza como entidades reales, existentes físicamente-.

El **campo magnético** se introduce mediante una exposición acerca de los imanes y algunos experimentos que los involucran. Así, el campo magnético es definido a partir de una propiedad de los imanes:

"Pensamos en un imán como poseedor de un campo magnético alrededor de él, similar al campo eléctrico que poseen las cargas eléctricas. Definimos las líneas de campo magnético como líneas a lo largo de las cuales un polo norte de prueba será arrastrado. O.... las podemos definir como las líneas a lo largo de las cuales una pequeña aguja de prueba de una brújula señalaría. Ambas definiciones dan los mismos patrones..."¹⁵⁰

Dentro de las propiedades del campo magnético y eléctrico, se resalta la diferencia entre ambos campos de fuerza, ya que uno pertenece a lo que llamamos imanes y el otro al mundo universal de las cargas eléctricas.

En esta parte del texto, se abre un pequeño paréntesis para describir actividades que el estudiante puede llevar a cabo para dibujar las líneas de campo de un imán, para después expresar algunas propiedades de las líneas de campo:

- Se comportan como tubos elásticos empujando y tratando de contraerse a lo largo de su longitud. Parece que estos tubos estuvieran llenos de un fluido.
- Su configuración depende del arreglo de imanes.
- El número de líneas que se encuentran en un volumen es proporcional a la magnitud del campo en ese lugar.

Además de las características anteriores, "es útil ver a estas líneas de fuerza como agentes mediante los cuales los imanes se jalen y empujan entre ellos, porque se van a encontrar ideas similares aplicadas a las fuerzas del campo magnético que ejercen las

¹⁴⁹ Rogers, E., Physics for the inquiring mind, p. 546.

¹⁵⁰ Ibidem , p. 570.

corrientes eléctricas entre ellas y en los imanes."¹⁵¹

Para terminar con la descripción del campo magnético y sus líneas de fuerza el autor hace énfasis en que los campos eléctricos son similares a los magnéticos, aunque son diferentes en naturaleza. Las ondas de radio viajan en una combinación de campos eléctricos y magnéticos, por lo que se puede pensar que las líneas de campo son reales; sin embargo, las líneas no se encuentran ahí, pero los campos sí.¹⁵²

El tema del magnetismo terrestre, el campo generado por una corriente eléctrica, materiales magnéticos y no magnéticos, y la inexistencia de monopolos magnéticos, llevan al autor a proponer una teoría microscópica del magnetismo.

Dentro de la teoría atómica propuesta en el texto, se tienen los siguientes puntos:

- Al cortar un imán repetidamente, veremos que está compuesto de imanes elementales, los cuales denominamos dominios.
- Los dominios o imanes elementales de un imán se encuentran ordenados de tal forma que en un extremo sólo se tienen polos sur y polos norte en el extremo contrario.
- La magnetización generada en una barra es limitada, es decir, una vez que todos sus dominios han sido alineados, no se puede hacer nada más.
- Un imán puede ser alterado mediante el calentamiento y el trato rudo.

El resumen de la presentación de los temas de corriente eléctrica y campo eléctrico y magnético, es complementado con los nueve puntos del análisis.

1. (historia) El autor no se apoya en la historia para la exposición de los temas de corriente eléctrica y campo. Sólo brinda algunos nombres y fechas de los descubrimientos o experimentos a los que hace referencia.

2. (analogías) Se utiliza solamente una analogía en la exposición de la corriente eléctrica, bajo la advertencia de que el uso de la comparación entre un circuito hidráulico y uno

¹⁵¹ Rogers, E., *Physics for the inquiring mind*, p. 572.

¹⁵² *Idem.*

eléctrico no les facilitará el entendimiento a aquellas personas que se inician en la materia.

La comparación entre ambos circuitos queda bien establecida, al presentar un gráfico en el cual hace una equivalencia entre los elementos del circuito hidráulico y los del circuito eléctrico. De la tubería en la que fluye agua, se resalta en primer lugar, que si se mide el flujo en cualquier parte de la tubería, este será el mismo; y en segundo lugar, que si se tiene una tubería más complicada, la cual conste de distintas ramas, en un punto donde todas las ramas se junte, el flujo medido será cero, esto si se le asigna signo positivo al flujo que llega a dado punto y negativo al flujo que se va.

Una vez que se ha descrito lo anterior, y se desea establecer la equivalencia de los dos aspectos anteriores, en el circuito eléctrico, se advierte de nueva cuenta que aunque ambos circuitos se parezcan entre sí, no significa que la corriente eléctrica presente la misma conducta.

"...hemos encontrado que un circuito eléctrico tiene propiedades experimentales similares a aquellas del circuito del agua. Como tal, es una buena enseñanza, pero mal utilizado como una prueba, sería mala ciencia."¹⁵³

Por lo tanto, esta analogía, puede dar algunas pistas para el estudio de los circuitos, pero el estudiante debe realizar sus propios experimentos, no sólo observar demostraciones. Aunque son mencionadas algunas diferencias y similitudes entre ambos circuitos, no hay un espacio en el que se explique en qué aspectos, esta comparación no es válida y cómo es que se puede comparar una resistencia con una tubería más delgada, una bomba de agua con una pila, etc. De igual forma, cómo es que los distintos conceptos utilizados para la descripción del circuito de agua (presión, los distintos anchos de la tubería, etc), está relacionados con lo que pasa en un circuito eléctrico.

Toda esta falta de explicación y límites en cuanto a la validez de la analogía, puede causar problemas en estudiantes que se enfrentan por primera vez con el tema de circuitos eléctricos (Gentner, D, & Gentner, D, 1983)

¹⁵³ Rogers, E., Physics for the inquiring mind, p. 506.

3. (simplificaciones) Los conceptos no se presentan de forma simplificada, aunque no se profundiza mucho en ellos. Esto se debe a que el texto está dedicado a personas que no han tenido mucho contacto con la Física.

4. (cuantitativo) A través del resumen de la presentación de los tres conceptos, se puede apreciar que el autor combina la experimentación con la teoría y los problemas de una manera equilibrada. Por lo que, los conceptos constituyen el fundamento de los experimentos presentados, así como con los problemas.

5. (problemas) Los problemas a los que hace referencia el texto, involucran la teoría y las experiencias que se han presentado lo largo de cada capítulo. Para la corriente eléctrica, los problemas son variados, ya que hacen referencia al uso del amperímetro, voltmetro, divisores de voltaje, etc.; aunque todos están ligados a los circuitos eléctricos. Es importante resaltar que, los problemas integran tanto la parte conceptual como la parte en la que el estudiante debe utilizar ecuaciones para llegar a un resultado numérico.

Al igual que para la corriente eléctrica, los problemas sugeridos en los capítulos de campo eléctrico y magnético, hacen que el estudiante reflexione sobre los fenómenos estudiados, y también le hacen utilizar las ecuaciones establecidas en los capítulos. Los problemas se encuentran al final de cada capítulo.

Hay que mencionar que mientras el autor expone los distintos temas, son pocos los problemas que resuelve, y la mayoría son de tipo conceptual, es decir, no se realizan cálculos o utilizan ecuaciones para resolverlos. Un ejemplo de ello, es que en el tema de campo eléctrico, el autor pide al lector comparar la intensidad de dos cargas puntuales, de las cuales se muestra un dibujo de sus líneas de fuerza.

6. (justificación) El autor no da una justificación explícita de los conceptos. Sin embargo a través de la exposición y de las experiencias presentadas, se ve el papel de cada fenómeno dentro de la teoría electromagnética, su participación en las experiencias de la vida diaria y la utilidad científica de cada uno. Esto, de acuerdo con el autor, deberá llevar al lector a apreciar la ciencia como un conjunto y dar a cada concepto y fenómeno la

importancia que tienen dentro de la teoría.

7. (relación) En el prefacio de la edición, queda definido que uno de los objetivos del texto es, mostrar al lector, a través de los distintos bloques, que la ciencia es un conjunto. Es decir, que las distintas partes de la Física se relacionan entre sí. Por lo tanto, el texto pretende ligar un capítulo con otro, de tal forma que la información lleve a explicaciones completas. Al revisar los capítulos correspondientes a los tres conceptos analizados, se aprecia la relación entre ellos. En el caso de la corriente eléctrica y el campo eléctrico, hace explícita la necesidad de un campo eléctrico para hacer que las cargas se muevan. Ya en los fenómenos electromagnéticos se relacionan los tres conceptos en un mismo fenómeno: el campo magnético generado por una corriente eléctrica. Estos son sólo dos ejemplos de las distintas formas en las que el autor liga los tres capítulos.

8. (experimentación) En la exposición de la corriente eléctrica y el campo eléctrico y magnético, se exponen distintas experiencias, para ejemplificar la teoría expuesta, así como para fundamentarla.

Son varios los ejemplos utilizados y llevaría varias páginas citarlos. Por esta razón, sólo mencionaré algunos. Para exponer los efectos de la corriente eléctrica, el autor echa mano de tres experiencias: el calor producido en un circuito eléctrico, el cual se observa en lámparas y fusibles, los efectos magnéticos producidos por un alambre enrollado, y los efectos químicos, para lo cual propone insertar un balde de agua en algún punto de un circuito, conectándolo al resto del circuito, y observar lo que sucede cuando el balde contiene agua, agua destilada, agua y ácido sulfúrico y una solución de sulfato de cobre. Dependiendo de las experiencias, se indican las variaciones posibles para obtener otros resultados, así como el material utilizado. Algunas de las experiencias se pueden reproducir fácilmente. Hay que resaltar que en la explicación de los experimentos, se consideran las variaciones que pueden existir al momento de reproducir el fenómeno, y además, se encuentran ilustrados adecuadamente, de tal forma que el lector pueda apreciar cómo debe quedar el dispositivo.

9. (ideas previas) El texto *Physics for the inquiring mind*, puede influir de distintas maneras en las concepciones de los estudiantes citadas en el capítulo 5. En primer lugar,

veremos cuáles de las concepciones de los estudiantes correspondientes al tema de **corriente eléctrica**, se pueden ver modificadas con ayuda del texto.

c5. La corriente eléctrica es gastada por los elementos del circuito.

Mediante la analogía detallada en el punto 2, el autor hace notar que, si se midiera el flujo de agua en varios puntos de un circuito hidráulico, se encontraría que tendría el mismo valor. Análogamente, si se midiera la corriente en cada punto de un circuito simple, se encontraría el mismo valor de corriente. Aunque, esto debe ser experimentado por el lector y no tomarlo como un hecho. Este experimento puede ayudar a los estudiantes a ver que la corriente no se gasta¹⁵⁴, y que en un circuito simple, esta se conserva.

c8. La corriente sale de los dos polos de la batería hacia los elementos del circuito.

El modelo del comportamiento de la corriente eléctrica en un circuito eléctrico sugerido por Rogers, indica que "hordas de electrones salen de la batería", y circulan alrededor del circuito para regresar a la batería y ser provistos de energía cinética. Esta idea puede ayudar a modificar la concepción de que los electrones salen por ambos polos de la batería, ya que el autor describe, que salen de uno de los polos y regresan por el contrario.

Aunado a lo anterior, se tienen las concepciones que el texto refuerza, y que no puede ayudar a modificar:

c1. La corriente eléctrica es un flujo de electrones.

En la parte en la que Rogers discute sobre los términos utilizados para denominar la corriente eléctrica, da la impresión de que no está de acuerdo en llamar flujo a la corriente eléctrica, sin embargo, menciona "ahora sabemos que *sí* hay un flujo, usualmente de electrones negativos, y hemos guardado esos términos en nuestro vocabulario

¹⁵⁴ Como se vió en la categorización de las ideas previas, los estudiantes piensan que parte de la corriente se va gastando al pasar a través de los distintos elementos del circuito.

eléctrico."¹⁵⁵

Otro aspecto, es que en su modelo de circuito eléctrico habla sobre montones de electrones en movimiento, lo cual le quita el carácter de fluido a la corriente eléctrica.

De esta forma, su posición acerca de llamar a la corriente eléctrica un flujo de electrones, no queda del todo clara, aunque no debe suponerse con ello, que se refiere a la corriente eléctrica como un fluido.

c6. Los componentes del circuito transforman la corriente en luz y calor.

c7. La corriente deja la batería por una terminal y regresa a ella por la terminal contraria.

c10. La batería transfiere cargas almacenadas que conforman la corriente a los elementos del circuito.

El modelo de circuito eléctrico propuesto por Rogers, y reportado en la presentación de la corriente eléctrica al inicio de este apartado, contiene las concepciones anteriores (c6, c7, c10)., por lo que no puede ayudar a modificarlas.

En cuanto a las concepciones de campo eléctrico y magnético presentes en estudiantes universitarios, aquellas que el texto no puede ayudar a modificar, son:

c9_e. La fuerza que ejerce el campo eléctrico, sólo será sentida por la partícula si esta se encuentra sobre una línea de fuerza.

c10_e. Las líneas de fuerza describen la trayectoria que cualquier partícula seguiría si fuera situada en las líneas.

De acuerdo con el texto, "cada línea de fuerza es una línea en la cual una pequeña carga de prueba es movida por el campo eléctrico."¹⁵⁶ Esto va de acuerdo con la concepción 9, y se ve aún más reforzada debido a que no se aclara que estas líneas son sólo una representación del campo y no darles el sentido real que les dio Faraday. La concepción 10 tampoco puede ser modificada por el texto, debido a que no hay una explicación de la forma en la que se mueven las partículas situadas en un campo eléctrico, en relación con

¹⁵⁵ Rogers, E., *Physics for the inquiring mind*, p. 505.

¹⁵⁶ *Ibidem*, p.546.

las líneas de fuerza.

Ahora bien, aquellas concepciones que pueden ser modificadas con ayuda del texto, son:

- c1_e.** Para que exista un campo eléctrico, debe haber una fuerza actuando sobre una carga.
- c2_e.** Un campo eléctrico sólo puede existir si hay cargas en movimiento.
- c4_e.** Los campos eléctricos son producidos por una carga puntual estática.
- c5_e.** Un campo eléctrico o magnético puede ser producido por una corriente eléctrica.

Las concepciones anteriores, conforman tres categorías (sección 5.4.3.), las cuales muestran, por un lado, que los estudiantes no pueden pensar en campo eléctrico sin ligarlo a un carga puntual estática o a una corriente eléctrica. También, al mencionar la palabra campo, inmediatamente se piensa en fuerzas eléctricas.

Es interesante observar cómo Rogers va ligando los campos eléctricos debido a concentraciones de cargas estáticas, y después introduce el campo eléctrico mediante la fuerza que siente una carga de prueba situada en un punto. De esta forma, no brinda una sola definición, sino que da varias situaciones bajo las cuales puede existir un campo eléctrico. Ya al final del capítulo, habla sobre las ondas electromagnéticas. En este apartado desliga al campo eléctrico de cualquier carga o corriente eléctrica, mencionando que en una onda electromagnética los campos magnético y eléctrico viajan juntos, son perpendiculares entre sí, y las variaciones de uno mantienen al otro, y así sucesivamente. La forma en que el autor liga la información, y presenta experiencias relacionadas, puede ayudar a los estudiantes a modificar las concepciones anteriores.

Por último, es importante mencionar, que todos los fenómenos relacionados con el campo eléctrico, son tratados en el mismo capítulo, de tal forma que la exposición es continua y lleva una secuencia.

5.2.4. Beyond the mechanical universe, Olencik, R., Apostol, T. & Goodstein, D.

Antes de comenzar el capítulo de **campo eléctrico**, se dedica un capítulo a la electricidad estática. Dentro de este capítulo, se hace una breve reseña sobre el descubrimiento de la electricidad, comenzando con Gilbert en el siglo XVI y terminando con Franklin. Con ello, introduce fenómenos electrostáticos, y la Ley de Coulomb.

El capítulo siguiente está dedicado al campo eléctrico, y comienza haciendo referencia a la dificultad que tenían los científicos de aceptar la idea de acción a distancia; hecho que resolvió Faraday al introducir el concepto de campo eléctrico. Así, la forma en que Faraday visualizó e introdujo el concepto, es reseñado por los autores al inicio del capítulo.

Las ideas de Faraday, proveen una descripción cualitativa sobre la conducta de las fuerzas eléctricas, por lo que los autores definen el campo de forma matemática:

".. imagine una sola partícula puntual cargada q en el espacio. Debido a que es la única carga presente, no hay claro, una fuerza actuando sobre ella. Ahora sabemos que si otra carga es colocada cerca de ella, esa carga experimentará una fuerza. Imaginemos una carga positiva q_0 , llamada una carga de prueba, colocada a una distancia r de q . La fuerza coulombiana sobre la carga de prueba es:

$$\vec{F} = q_0 \left(K_e \frac{q}{r^2} \hat{r} \right) \quad \dots (1)$$

... La carga de prueba detecta la fuerza, pero la cantidad en paréntesis existe ya sea que q_0 se encuentre o no ahí, para detectarla. Esta cantidad se denota como **E**, es llamada el campo eléctrico generada por una carga puntual aislada q .¹⁵⁷

La ecuación de campo, entonces, define una función vectorial, que depende de la carga puntual y de la posición de la carga de prueba. De acuerdo con los autores, una vez que se tiene la definición del campo eléctrico, nuestra atención debe estar dirigida a él y no a las fuerzas eléctricas.

Antes de pasar a los ejemplos del campo eléctrico generado por una distribución continua

¹⁵⁷ Olencik, R., et. Al., Beyond the mechanical universe, pp. 32-33.

de carga, el autor generaliza el concepto de campo. Esto es, si en lugar de tener una carga puntual, se tienen varias, entonces, el campo total será el resultado del campo de cada una de ellas. De igual forma, si se sitúa una carga positiva de prueba en varios puntos, midiendo la fuerza y dibujando el vector E , en cada punto; la colección de vectores obtenidos, es llamada un campo vectorial, y darán un mapa geométrico del campo eléctrico.

Antes del capítulo dedicado al **campo magnético**, se presenta uno de magnetismo. Dentro de este capítulo, se reseña el inicio del estudio del magnetismo con los chinos y griegos, hasta formalizarse con el trabajo de Gilbert a finales del siglo XVI y principios del XVII.

En el siguiente apartado, se describen las fuerzas magnéticas. Faraday fue el creador del concepto de líneas de fuerza, y, *"concibió la idea de un campo magnético, como una colección de líneas de fuerza llenando el espacio alrededor del imán. Para Faraday el campo magnético proveía una forma de describir la conducta de los imanes, de manera similar que el campo eléctrico describía la conducta de las cargas."*¹⁵⁸

Las líneas de fuerza son caracterizadas, a través de las siguientes propiedades:

- Pueden ser visualizadas por medio de las agujas de brújulas.
- Las líneas de campo que unen los dos polos, del norte al sur, forman círculos cerrados.

El magnetismo es explicado por medio de la teoría de dominios. Esta teoría microscópica, tiene como argumento principal, el que los imanes están formados de regiones pequeñas llamadas dominios. Cada uno posee un polo sur y uno norte, que se comporta como un dipolo.

Es importante mencionar que la exposición de la Ley de Gauss y la fuerza de Lorentz, se realiza de manera inmediata, sin haber aclarado que el concepto de Faraday sobre el

¹⁵⁸ Olenick, R., et. al., Beyond the mechanical universe, p. 164.

campo magnético, no es el que se posee hoy en día.

El capítulo de campo magnético comienza con el descubrimiento de Oersted, el cual trajo a la luz la relación entre la electricidad y magnetismo. En este apartado, se pone atención en la vida del científico, así como en la de Ampère.

A esta introducción, sigue la exposición de la Ley de Biot y Savart y un ejemplo de su aplicación. A partir de la Ley de Biot y Savart, y hasta terminar el capítulo, se exponen distintas leyes o herramientas que ayuden a calcular el campo magnético, debido a una corriente eléctrica, la fuerza entre dos cables por las que circula corriente, etc., sin hacer referencia al campo magnético. Por lo tanto, la única definición que se tiene es la brindada por Faraday.

Antes del capítulo de circuitos eléctricos, los autores dedican un capítulo a la batería eléctrica. Dentro de este capítulo, se hace una reseña histórica sobre el trabajo de Galvani y Volta, así como los detalles de la teoría de la conducción en metales y el funcionamiento de la pila.

Dentro de la exposición acerca del funcionamiento de los metales, se tiene que:

- *Desde un punto de vista electrostático, un conductor es una región de potencial constante. Si en la vecindad hay cargas eléctricas, o el metal tiene una carga neta, entonces habrá un campo eléctrico.*
- *Sólo los electrones pueden ser capaces de moverse libremente en un metal.*
- *Los electrones más cercanos a los átomos se encuentran atados fuertemente a los núcleos, formando iones positivos, pero los electrones más alejados -uno o dos- no saben de qué átomo vinieron originalmente y son libres de moverse en todo el metal. Son los llamados electrones de conducción.*
- *Aunque hay varios campos eléctricos debido a la presencia de todas las cargas, el campo neto en el metal, es cero.*
- *Los electrones pueden moverse libremente dentro del metal, pero difícilmente podrán escapar de él.¹⁵⁹*

¹⁵⁹ Olenick, R., et. Al., Beyond the mechanical universe, pp.117-122.

Un par de páginas son dedicadas a detallar el porqué los electrones no pueden escapar del metal, describiendo la función de trabajo, y la energía necesaria para que dependiendo del metal, los electrones puedan escapar.

Ahora bien, con respecto a la exposición sobre el funcionamiento de las baterías, se tiene:

- *Volta pensó que había encontrado una fuente de carga perpetua.*
- *El secreto para mantener el flujo de carga un período largo de tiempo, tiene que ver con la química: la química de los electrolitos.*
- *Un electrolito es un fluido en el cual las moléculas se disocian en iones positivos y negativos que se pueden mover y conducir electricidad.*
- *La batería utiliza un electrolito, con dos metales distintos como electrodos.*
- *Si se unen los dos metales sumergidos en el electrolito a un foco en el exterior, habrá una flujo continuo de electrones a través del filamento del foco.*
- *La fuente de la energía radiada por el filamento –del foco en un circuito- es el abastecimiento de iones en el electrolito, el cual se agota gradualmente.*
- *La energía de la batería está almacenada en los componentes químicos del electrolito, mientras que lo que hace que la corriente fluya, es la diferencia en las funciones de trabajo de los electrodos. Los detalles químicos que tiene lugar en la pila, pueden ser muy complicados, y dependen del electrolito y de los electrodos.*
- *La energía que se libera en el proceso químico, aparece en forma de energía eléctrica.*¹⁶⁰

El capítulo de circuitos eléctricos da inicio con la mención que al principio del siglo XIX, la electricidad pasó de ser una curiosidad, a una fuerza conductora de la civilización; de aquí, que se le de gran importancia al telégrafo. Los hechos históricos a los que se hace referencia, son el descubrimiento de Oersted, Gauss, Weber, Wheastone y Morse, entre otros. Todos los científicos mencionados, contribuyeron de alguna manera a la creación del telégrafo. La conducción eléctrica en cables, es la forma de introducir el concepto de **corriente eléctrica**:

¹⁶⁰ Olenick, R., et. Al., Beyond the mechanical universe, pp. 123-125.

"Si cualquier cantidad de carga es aplicada a los extremos del conductor, tal como un cable metálico, las cargas se moverán rápidamente hasta que se establezca el equilibrio de nuevo. Para un buen conductor, como el cobre o la plata, esto se lleva a cabo en una fracción de segundo. Pero si los extremos del cable está conectados a una fuente de diferencia de potencial eléctrico... entonces el equilibrio es alterado continuamente. Los electrones son empujados de una terminal a la otra, formando una corriente eléctrica que continua fluyendo tanto tiempo como la fuente genere la diferencia de potencial eléctrico. Debido al campo eléctrico en el cable, los electrones experimentan una fuerza y son acelerados."¹⁶¹

Del párrafo anterior, resaltan varios aspectos de importancia para que exista una corriente eléctrica, como es la presencia de un campo eléctrico. Después de esto, se explica cómo es el movimiento de los electrones en el interior del metal; esto es, las colisiones con otros electrones y las imperfecciones de la estructura metálica, y cómo esto implica una transferencia de energía cinética de los electrones a la estructura, la cual se calienta como resultado de las colisiones.

Es pertinente aclarar que, debido a las colisiones, se hacen simplificaciones acerca de la velocidad de arrastre, considerando que todos los electrones tienen esta velocidad. El objetivo de esta simplificación es poder estudiar la dependencia entre el flujo y factores tales como la naturaleza de la fuente eléctrica y el tipo de cable utilizado como conductor.

Ya que se han aclarado los detalles sobre el movimiento de electrones, la definición matemática de la corriente queda expresada como el número de cargas positivas que pasan en un intervalo de tiempo a través de una sección transversal del cable.

El análisis del texto queda condensado en los siguientes nueve puntos:

1. (historia) La historia es utilizada por los autores en varios puntos de la exposición. En primer lugar, para la introducción del **campo eléctrico**, se presenta cómo se descubrió la electricidad estática. Esta fue descubierta alrededor del año 600 a. C. y su estudio fue documentado por Gilbert en el 1600 d.C. En esta reseña se describe cómo es que se fue dando el nombre a los materiales que podían conducir la electricidad y a los que no la conducían, la invención de los términos carga positiva y negativa por parte de Franklin. El desarrollo del campo eléctrico, se fue dando junto con la de la corriente eléctrica, es por ello, que en esta introducción se incluyen de cierta manera los avances que se fueron

¹⁶¹ Olenick, R., et. Al., Beyond the mechanical universe, p. 131.

dando al respecto. De igual forma, los científicos sostuvieron distintas concepciones acerca de la corriente eléctrica, el autor menciona algunas de ellas. En primer lugar, la consideración de la electricidad como una virtud, y en segundo lugar, la concepción de Dufay, quien, de acuerdo con los autores, veía a la electricidad como fluidos sin peso capaces de fluir de un cuerpo a otro, con el fin de electrizarlo. Atendiendo a esto, los autores dejan claro que aquello que Dufay consideraba como un fluido, ahora es conocido como carga eléctrica.

También se utiliza la acción a distancia para describir la forma en que Faraday ideó las líneas de fuerza, con el fin de explicar las acciones eléctricas. Se habla sobre el trabajo de Faraday y la forma en que concebía las líneas de fuerza, y, de acuerdo con ellos la concepción de Faraday, describe en gran manera la forma en que se comporta el campo, sin embargo, no es útil para describirlo matemáticamente.

Hay que recordar, que la concepción de Faraday acerca del campo, evolucionó, hasta llegar a la concepción que se tiene hoy día. Por lo tanto, no se puede decir que la forma en que Faraday concebía el campo, en especial la forma en que se propagaban las acciones eléctricas, provea una descripción cualitativa del campo y que, complementada con la formulación matemática provista por los autores, conforme la concepción actual de campo eléctrico.

Dado el enfoque que se le da a la concepción de Faraday sobre el campo eléctrico, se omite el trabajo de científicos como Maxwell, Lorentz y Einstein. Como consecuencia, no se expone el concepto de campo que cada uno de ellos sostenía y la forma en como se vió modificada la concepción de Faraday.

En el capítulo de **magnetismo**, se utiliza una reseña histórica para introducir el magnetismo. Esta es similar a la del capítulo de electrostática. Parte del descubrimiento que hicieron los antiguos griegos sobre las propiedades de la magnetita hasta la documentación del estudio del magnetismo por William Gilbert. Así, se brindan algunos datos de la vida del científico y de su influencia sobre los navegantes, referente al uso de la brújula.

Otro aspecto, que es tratado brevemente, es la concepción de Faraday, que al igual que

en el caso del campo eléctrico, concebía al campo magnético como una colección de líneas de fuerza llenando el espacio alrededor del imán. El campo magnético, era para él, una forma de describir la conducta de los imanes.

Los autores no mencionan cómo fue evolucionando la concepción de Faraday hasta llegar a la que se tiene hoy día. Debido a esto, los estudiantes pueden pensar que dicha concepción, nunca cambió, y es la que se maneja actualmente. Otra consecuencia de lo anterior, son las concepciones que los estudiantes poseen sobre las líneas de fuerza, y que son similares a las de Faraday.

A diferencia de cómo se utilizó la historia para presentar los conceptos de campo eléctrico y magnético, para el tema de corriente eléctrica, sólo se hace referencia al trabajo de Galvani y Volta principalmente y de manera inmediata se propone un modelo de conducción en metales. De esta forma, los resultados obtenidos por ambos científicos, pueden ser contrastados con la teoría actual sobre la conducción en metales.

La reseña histórica, excluye las concepciones que Galvani y Volta sostuvieron sobre la corriente eléctrica, así como la forma en que los estudios sobre la corriente eléctrica evolucionaron, y por consiguiente, deja de lado la inclusión de los electrones al modelo de corriente eléctrica.

2. (analogías) Los conceptos no son introducidos por medio de analogías, ni se utilizan en la explicación de algún fenómeno relacionado.

3. (simplificaciones) Los conceptos de campo eléctrico y magnético, no son discutidos por los autores. Esto es, en ambos casos, se adoptan las concepciones que de ellos tenía Faraday, simplificando con ello la presentación de los conceptos.

En cuanto a las simplificaciones realizadas en el tema de corriente eléctrica, los autores aclaran cuáles son las simplificaciones, al pasar del movimiento de los electrones dentro del conductor, al modelo que lo describe.

4. (cuantitativo) El trato que los autores hacen de los temas, es equilibrado. Esto es, le dan tanta importancia a los conceptos como a la formulación matemática de ellos. Es

importante hacer notar, que pese a que los conceptos no son establecidos de forma clara y precisa, la exposición de los conceptos no se encuentra centrada en las ecuaciones que representan cada fenómeno.

5. (problemas) Los problemas resueltos que se presentan después de la exposición de cada concepto, están relacionados directamente con la información contenida en el texto, así como con las ecuaciones establecidas.

En el caso del campo eléctrico, el primer problema se enfoca a determinar la aceleración de una esfera cargada que es colocada en un campo eléctrico; y el segundo, se propone determinar el campo eléctrico en un punto debido a un arreglo de dos cargas positivas.

Para el campo magnético, los autores proponen obtener la ecuación que describe el campo magnético a lo largo del eje de un dipolo, y una serie de preguntas que permiten que el lector reflexione acerca de la explicación microscópica que se ha dado del magnetismo, así como problemas de tipo matemático.

El capítulo que se ha dedicado a la batería, contiene preguntas que piden explicar de forma cualitativa algunos fenómenos de conducción eléctrica. Sin embargo, el capítulo de circuitos eléctricos, en el cual se brinda la definición de la corriente eléctrica, así como el modelo de conducción en cables, presenta un primer apartado con preguntas, que permitirán al lector reflexionar sobre el fenómeno de la corriente eléctrica. Un apartado adelante, los problemas se enfocan a la resolución de circuitos eléctricos.

6. (justificación) El capítulo de campo eléctrico, comienza citando el problema que representaba para los científicos del siglo XVIII y XIX el pensar en la acción a distancia:

“La idea de fuerza transmitida sin que los cuerpos se encuentren en contacto era difícil de aceptar para la mayoría de los científicos de los siglos dieciocho y diecinueve... A la mitad del siglo diecinueve, Michael Faraday ayudó a resolver este dilema mediante la introducción del concepto de campo eléctrico.”¹⁶²

De aquí que la importancia del campo eléctrico, sea el explicar porqué los cuerpos

¹⁶² Olencik, R., Apostol, T. & Goodstein, D., *Beyond the mechanical universe*, p. 31.

pueden ejercer entre sí fuerzas y no estar en contacto. Esta justificación también es aplicada al campo magnético. Es de notarse que, el campo eléctrico fue creado como una necesidad de explicación de un fenómeno, y más adelante, Einstein se refiere a él como necesario para la descripción de los fenómenos electromagnéticos.

Se ha visto que sí se brinda una justificación al concepto de campo como un concepto fundamental para la explicación de las acciones electromagnéticas, sin embargo, esta importancia puede ser pasada de largo por el lector, ya que no se le brinda demasiada atención.

A la corriente eléctrica no se le da el mismo tratamiento, es decir, no se menciona la importancia que tiene dentro de la teoría electromagnética.

7. (relación) La presentación de los campos eléctrico y magnético, parte del trabajo de Faraday. La forma en que Faraday los describió mediante líneas de fuerza, es la única relación a la que se hace referencia entre el campo eléctrico y magnético. Con ello, se puede observar que conceptualmente se encuentran al mismo nivel, no siendo así con la corriente eléctrica.

Es importante resaltar que no se profundiza mucho en esta relación, ni se establece alguna otra, entre el campo eléctrico y magnético, o entre estos dos y la corriente eléctrica.

8. (experimentación) Experimentos que ayuden a comprender mejor los conceptos o a visualizarlos, no son incluidos en el texto.

9. (ideas previas) Los ocho puntos anteriores, nos muestran cuáles son los aspectos en los que se hace énfasis en el texto, y aquellos que son omitidos o se les presta poca atención. De esta forma, se ha podido observar que los autores tienen cuidado de introducir los conceptos utilizando la historia, y la exposición de los mismos, es equilibrada.

Tomando en cuenta los puntos analizados, se tiene que el texto puede ayudar al lector a ver al **campo eléctrico** como necesario para explicar las interacciones eléctricas. Por lo

que las concepciones de los estudiantes que sólo consideran un campo eléctrico tomando en cuenta fuerzas o partículas cargadas estáticas pueden verse modificadas.

En cuanto a las concepciones de los estudiantes sobre la **corriente eléctrica**, se tiene que el texto refuerza algunas de ellas:

c1. La corriente eléctrica es un flujo de electrones.

En la exposición de la corriente eléctrica, los autores se refieren a un *flujo de carga*, el cual es mantenido por la batería. Así, aunque el autor no esté considerando a la corriente eléctrica como un fluido, los estudiantes lo pueden interpretar de esa manera.

c5. La corriente eléctrica es gastada por los componentes del circuito.

c6. Los componentes del circuito transforman la corriente en luz y calor.

Este par de concepciones, responden a la influencia que tienen los componentes en la corriente eléctrica; y se ven reforzadas por el texto, cuando se menciona que *la fuente de la energía radiada por el filamento –del foco en un circuito- es el abastecimiento de iones en el electrolito, el cual se agota gradualmente*. Aunque el autor hace referencia a que la duración del electrolito depende de la química, el lector puede quedarse con la idea de que la batería se agota, debido a que los componentes del circuito gastan la corriente eléctrica.

Ahora bien, la concepción que el texto sí puede ayudar a modificar, corresponde a:

c8. La corriente sale de los dos polos de la batería hacia los elementos del circuito.

De acuerdo con el texto, los electrones son empujados de una terminal a la otra, formando una corriente eléctrica, por lo tanto, no fluyen de ambos polos de la batería hacia el circuito, sino de un polo al otro.

5.2.5. Electromagnetism: Principles & Applications, Lorrain, P. & Corson, D.

El tema del **campo eléctrico** es abordado por los autores, a continuación de la Ley de Coulomb en el primer capítulo:

"Pensamos en la fuerza entre las cargas puntuales Q_a y Q_b en la ley de Coulomb como el producto de Q_a y el campo de Q_b o viceversa. Definimos la intensidad de campo eléctrico \mathbf{E} como la fuerza por unidad de carga ejercida en una carga de prueba en el campo. Entonces la intensidad de campo eléctrico debido a la carga puntual Q_a es:

$$\vec{E}_a = \frac{\vec{F}_{ab}}{Q_b} = \frac{Q_a}{4\pi\epsilon_0 r^2} \vec{r}_1 \quad \text{... (2)} \quad \text{''163}$$

Los autores aclaran que el campo debido a la carga a , es el mismo, sin importar si la carga b se encuentra o no en el campo. No señalan, lo que en su consideración es una carga de prueba, ni porqué se define así el campo. Por lo que, pasan inmediatamente a explicar el principio de superposición, continuando con conceptos como el del potencial eléctrico, para con estos resolver el dipolo eléctrico.

Las líneas equipotenciales son mencionadas de forma breve como aquellas que se encuentran a cierto potencial, y las líneas de campo como aquellas que resultar de unir de fin a fin los vectores infinitesimales que representan al campo (\mathbf{E}), y serán normales a las superficies equipotenciales.

El concepto de **campo magnético** es mencionado en la presentación de la inducción magnética. A partir de este capítulo se habla del campo magnético, pero en el texto no se dedica un espacio en el que se expliquen sus características, naturaleza, etc. Sólo se menciona que "al igual que en electrostática, se puede describir al campo magnético mediante las líneas de \mathbf{B} , las cuales son tangentes a \mathbf{B} ."¹⁶⁴ Unas páginas después de que se ha expuesto el concepto de campo magnético, se presenta un diagrama que ejemplifica un arreglo magnético descrito a partir de las líneas.

¹⁶³ Lorrain, P. & Corson, D. Electromagnetism: Principles and Applications, p. 43.

¹⁶⁴ Ibidem, p. 202.

La **corriente eléctrica** es expuesta por los autores de la siguiente manera:

"..., si un campo eléctrico es mantenido por una fuente externa -por ejemplo, cuando se conecta un cable de cobre entre las terminales de una batería- entonces los portadores de carga son arrastrados en el campo y hay una corriente eléctrica."¹⁶⁵

De manera inmediata, se procede a ligar la corriente eléctrica a los circuitos, dejando como única discusión, la definición que he citado y la aclaración de que los portadores de carga pueden ser electrones u hoyos.

En uno de los capítulos finales, en donde se habla sobre la corriente de densidad \mathbf{J} , se establecen varios tipos de corriente eléctrica:

- a. La corriente de conducción a través de los buenos conductores, como el cobre.
- b. La corriente de conducción en semiconductores donde los hoyos pueden ser arrastrados por el campo.
- c. Corrientes electrolíticas originadas por el movimiento de iones.
- d. El movimiento de electrones o iones en el vacío, dando origen a corrientes de convección.
- e. Las corrientes que provoca el movimiento de cuerpos macroscópicos cargados.
- f. La corriente de desplazamiento.

Esta lista de "tipos de corrientes", sirve para describir los términos matemáticos incluidos en la densidad de corriente total. Por lo tanto, no se explica ningún tipo de corriente, es decir, qué fenómeno describe cada una, ni el porqué se les ha denominado así.

Se puede decir que el tratamiento del tema es cuantitativo. Los autores tal y como lo han expuesto en el prefacio a la edición, dan más importancia a la resolución de problemas, aun con la debida exposición de los conceptos involucrados; exposición que consiste en el establecimiento de las ecuaciones que ayudan a calcular la magnitud, ya sea del campo eléctrico y magnético, o de la corriente eléctrica.

El resultado del análisis de los aspectos presentados en el apartado 6.1, se enlista a continuación.

¹⁶⁵ Lorrain, P. & Corson, D. Electromagnetism: Principles and Applications, p. 109.

1. (historia) El texto no presenta antecedentes históricos.

2. (analogías) Los autores no utilizan analogías en la exposición de los conceptos.

3. (simplificaciones) Los campos eléctrico y magnético, quedan plasmados en dos ecuaciones: la primera de ellas corresponde a la fuerza ejercida entre dos cargas estáticas, y la segunda, al campo magnético en un punto cercano a un alambre por el que circula una corriente. Con estas ecuaciones se pretende que el estudiante comprenda lo que es el campo, además de que sea capaz de resolver problemas que involucren estos conceptos y ecuaciones.

El concepto de corriente eléctrica, es explicado de forma más amplia, en comparación a los otros dos. De la exposición resalta la ecuación que describe la conductividad de un material conductor dependiendo del campo eléctrico que se le haya aplicado.

4. (cuantitativo) El trato de los tres conceptos es meramente cuantitativo. Los conceptos quedan condensados en ecuaciones que sólo dicen cómo calcular la magnitud de los campos eléctrico o magnético o de la corriente eléctrica.

5. (problemas) Al ser presentados de forma cuantitativa, los tres conceptos conforman un paquete de ecuaciones cuya aplicación se encuentra en la resolución de problemas.

En el caso de la corriente eléctrica, los problemas enunciados en el texto se enfocan a los circuitos eléctricos, mientras que en el caso del campo eléctrico y magnético, los problemas consisten en el cálculo del potencial en un punto, debido a un dipolo eléctrico, y a encontrar la expresión del campo magnético generado por un alambre por el que circula corriente.

Los problemas expuestos durante el tema de campo eléctrico y magnético no hacen referencia a los instrumentos utilizados para medir el campo, los valores comunes o reales de un campo debido a un imán o a algún tipo de onda electromagnética, ya sea de radio o las microondas. Los ejemplos utilizados durante la exposición de la corriente

eléctrica, sí presentan valores de corriente, voltaje y resistencia utilizados diariamente en focos.

6. (justificación) La presencia de los conceptos dentro de la teoría queda justificada, al ser considerados como ecuaciones necesarias para la resolución de problemas.

7. (relación) Cada tema, el de campo eléctrico, magnético y corriente eléctrica es tratado de forma casi independiente. Las únicas relaciones entre los conceptos que los autores establecen son: la presencia de un campo eléctrico origina una corriente eléctrica, la densidad de corriente es proporcional a la intensidad del campo eléctrico, y la generación de un campo magnético alrededor de un cable por el que circula corriente.

Las relaciones anteriores, son mencionadas por el autor, sin profundizar en ellas. Por lo tanto, la articulación que se da entre ellos es sólo de forma aparente.

8. (experimentación) Los autores no se valen de experimentos para presentar los temas. El campo magnético es presentado a partir de una experiencia pensada; que corresponde a un arreglo de cargas estáticas.

Aunque la ecuación del campo magnético se obtiene a partir de lo que sucede en un circuito por el que circula una corriente; este experimento no es explicado, ni se establecen las condiciones bajo las cuales se obtiene el fenómeno, o cómo se puede saber de manera experimental si se genera un campo alrededor del cable.

Los ocho puntos anteriores, junto con la exposición de los tres conceptos, reflejan que el objetivo del texto no es el profundizar en los conceptos para que los estudiantes los comprendan y formen los suyos propios; antes bien, se preocupa más por las ecuaciones y la aplicación de estas a la resolución de problemas.

9. (ideas previas) En cuanto a las concepciones de los estudiantes, algunas se ven reforzadas por la forma en que presenta el texto el concepto de campo eléctrico:

c1. Para que exista un campo eléctrico, debe haber una fuerza actuando sobre una

carga.

c4. Los campos eléctricos son producidos por una carga puntual estática.

c8. Si una carga es colocada en un campo eléctrico, éste ejercerá una fuerza sobre ella, ocasionando que se mueva.

La razón de que el texto refuerce estas concepciones, es que, éste, sólo introduce el campo eléctrico en términos de un arreglo de cargas estáticas que ejercen una fuerza sobre una carga puntual. Los autores no sugieren otras condiciones bajo las cuales pueda considerarse la presencia de un campo eléctrico. Por lo tanto, los estudiantes sólo son capaces de identificar un campo eléctrico mediante la presencia de cargas eléctricas estáticas.

Respecto al campo magnético, la siguiente concepción encontrada en los estudiantes universitarios, es apoyada con la presentación del tema por parte del texto:

c5. Un campo eléctrico o magnético puede ser producido por una corriente eléctrica.

El campo magnético es derivado del fenómeno de inducción electromagnética, calculando con una ecuación cuál es el valor del campo magnético en un punto cercano a un alambre por el que circula una corriente. Este es el fenómeno utilizado por Lorrain y Corson en la introducción del tema ***Campos Magnéticos***.

5.2.6. Electricity & Magnetism, Purcell, M.

El primer capítulo trata el **campo eléctrico**, mediante la influencia que ejerce un arreglo de cargas sobre una carga determinada, a la cual llama q_0 . Dicho efecto dependerá del arreglo de cargas original y será proporcional a la carga q_0 .

“si dividimos entre q_0 , obtenemos una **cantidad vectorial** que depende solamente de la estructura del sistema original de cargas..., y en la posición del punto x,y,z . Llamamos a este vector, función de x, y, z el **campo eléctrico**, proveniente de las cargas q_1, \dots, q_N , y lo denominamos con el símbolo \vec{E} . Las cargas son las **fuentes** del campo.”¹⁶⁶

El autor distingue continuamente entre el campo electrostático y el campo generado por cargas en movimiento. De esta forma, hace que el lector espere “algo más”, es decir otras propiedades de campo y fenómenos conforme se avance en la lectura del texto.

Regresando a la definición del campo eléctrico, sus límites quedan establecidos por el autor. Estos límites consisten en considerar que al momento de acercar la carga q_0 al arreglo original q_1, \dots, q_N , estas últimas se pueden mover y el campo ya no correspondería al descrito por la definición. Por lo tanto, la definición es adecuada cuando no están presentes las cargas de prueba.

El campo eléctrico presenta las siguientes características:

- Le da a cada punto del sistema una propiedad, de tal forma que si se conoce el valor de \vec{E} en cada punto del espacio, se sabrá lo que le suceda a cada carga en el vecindario.
- No es necesario saber qué produjo el campo, mientras se conozca el campo en cada punto se tendrá una descripción completa del sistema.
- Para visualizar un campo eléctrico es necesario asociarle un vector, esto es, una dirección y magnitud en cada punto.

Dadas las características anteriores, se introducen las **líneas de campo**, las cuales son sugeridas por el autor como una ayuda para visualizar el campo; y corresponden a:

¹⁶⁶ Purcell, E., Electricity & Magnetism, p. 16.

“curvas cuya tangente, en cualquier punto, está en la dirección del campo en dicho punto. Estas curvas serán suaves y continuas excepto en singularidades como puntos de carga,... donde el campo es cero”¹⁶⁷

Aunque las líneas de campo son utilizadas de manera frecuente en el texto, la exposición que se hace de ellas es breve.

El capítulo 5, corresponde a la introducción del **campo magnético**. Para ello, el autor hace una breve reseña histórica en la que narra el desarrollo del magnetismo comenzando con el descubrimiento de Oersted y finalizando con los postulados de Einstein. El experimento de Oersted es el elemento clave para la explicación de las cargas en movimiento que poseen los imanes, es decir, corrientes eléctricas en escala atómica, idea que comenzó con Ampère.

Las experiencias descritas y otras más, pueden ser explicadas por medio de la introducción del campo magnético, con la siguiente anotación:

“(El campo eléctrico, recuerda, fue una forma simple de describir la “acción a distancia”, entre cargas estacionarias que es expresada en la Ley de Coulomb). Decimos que una corriente eléctrica tiene asociada a ella un campo magnético que permea el espacio circundante. Cualquier otra corriente o carga en movimiento que se encuentre en este campo, experimenta una fuerza proporcional a la intensidad del campo magnético en esa localidad.”¹⁶⁸

De esta forma, nos encontramos en la misma situación bajo la cual se describió el campo eléctrico: como un efecto sentido por alguna partícula dentro del espacio en el que se encuentra un campo eléctrico; y que está ligado a una corriente o carga en movimiento, así como el campo electrostático está ligado a una carga estática.

El texto, toma la siguiente ecuación como la definición del campo magnético B:

$$\vec{F} = q\vec{E} + \frac{q}{c}\vec{v} \times \vec{B} \quad \dots (3)$$

A pesar de que el autor, aclara que la relación anterior no dice nada sobre el campo magnético, deja a las secciones siguientes el trabajo de aclarar porqué es válida la ecuación 2. Dichas secciones corresponden a la medición e invariancia de una carga en movimiento y la medición de los campos eléctrico y magnético desde distintos marcos de

¹⁶⁷ Purcell, E., Electricity & Magnetism, p. 19.

¹⁶⁸ Ibidem, p. 173.

referencia, entre otras cosas.

Algunas características del campo magnético son:

- a. El campo magnético, al igual que el eléctrico es un mecanismo para describir la interacción de partículas cargadas. El concepto de campo como intermediario es útil, en el sentido en que se sabrá cómo se comportan las cargas bajo ciertas condiciones; por lo tanto el campo es una entidad independiente.
- b. Las demás características consisten en la deducción de las ecuaciones que describen el comportamiento del campo magnético.

El capítulo 4 se ocupa de la **corriente eléctrica**. Su inicio corresponde a la explicación del porqué de la corriente eléctrica:

"Las corrientes eléctricas son causadas por el movimiento de portadores de carga. La corriente eléctrica en un cable es la medida de la cantidad de carga que pasa por cualquier punto del cable por unidad de tiempo.... Claro, siempre es el transporte de la carga neta lo que cuenta..."¹⁶⁹

Con base en lo anterior, el autor genera una discusión de la forma en que se mediría el número de portadores de carga que pasen por un área dada del conductor, haciendo énfasis en que es un proceso en tres dimensiones.

Es importante resaltar que el texto incluye información sobre estos portadores, por ejemplo, que se mueven a distintas velocidades, lo cual incluye movimientos en distintas direcciones y diferentes magnitudes. La importancia de esto radica en que muchas veces los estudiantes conciben a la corriente eléctrica como un movimiento ordenado de partículas en una dirección.

Aunque las relaciones para determinar una corriente de electrones forman parte importante del texto, y se pasa rápidamente de la discusión sobre la medición del número de portadores que atraviesan un área en un período de tiempo determinado a la Ley de Ohm, el autor propone un apartado en el que establece un modelo de conducción.

Algunos puntos del modelo de conducción, son:

- a. La corriente eléctrica está asociada al campo eléctrico.
- b. No todos los materiales conductores se comportan de la misma forma.
- c. Los portadores de carga pueden ser positivos o negativos. (En la mayoría de

¹⁶⁹ Purcell, E., Electricity & Magnetism p. 124.

los casos sólo se asocia la corriente eléctrica con los electrones)

- d. Un campo eléctrico ejerce una fuerza sobre los portadores, la cual les produce una aceleración constante en una dirección.
- e. La dirección de los portadores de carga es alterada debido a las colisiones con otros portadores o átomos. Existe un tiempo promedio entre dichas colisiones, que no depende del campo si éste no es muy fuerte.

De esta forma, el texto deja expresado que la corriente eléctrica se debe a un movimiento de portadores de carga. También presenta de forma amplia el modelo de conducción, equilibrando las relaciones matemáticas y la exposición escrita del tema.

La **corriente de desplazamiento** es presentada como un elemento faltante dentro de las ecuaciones que describen el campo magnético. Haciendo un análisis tanto físico como matemático de porqué el término que la describe $\partial \vec{E} / \partial t$, es el término faltante en las ecuaciones de Maxwell.

Otros aspectos del análisis, quedan concentrados en los siguientes puntos:

1. (historia) “De Oersted a Einstein” es el título de la reseña histórica que conforma la introducción al capítulo de campo magnético¹⁷⁰. Como el título lo indica, abarca desde los descubrimientos de Oersted hasta los postulados de Einstein; haciendo énfasis en el descubrimiento del primero sobre la deflexión de la aguja de una brújula al pasar una corriente paralela a ella. Los resultados obtenidos por Maxwell, Faraday y Hertz, quedan de lado, al pasar rápidamente del descubrimiento de Oersted al principio de la relatividad, el cual tiene sus raíces en el electromagnetismo. El brinco entre los inicios del electromagnetismo y la teoría de la relatividad, se debe a que el autor considera que con la relatividad, el estudiante puede ver de forma directa y simple la relación entre la electricidad y el magnetismo.

En la reseña histórica son omitidas algunas de las etapas que fueron cruciales en el

¹⁷⁰ Sólo se presentan antecedentes históricos en el tema de magnetismo.

desarrollo del concepto de campo:

- a. La época de Faraday, en la que el campo se concebía como una estructura de líneas de fuerza, las cuales se encargaban de transmitir las fuerzas electromagnéticas. Con esta teoría, el éter tomó un papel fundamental en el desarrollo de la teoría electromagnética. Thomson y Maxwell compartieron con Faraday la visión de un éter necesario para la transmisión de las acciones electromagnéticas.
- b. La separación del éter y la materia, así como el reconocimiento de ambos como entidades independientes por parte de Lorentz, caracterizaron otra época, en la que el campo seguía ligado al éter. Durante esta etapa, los electrones toman un lugar importante dentro de la teoría electromagnética. Hay que recordar que la importancia del trabajo de Lorentz radica en que, sus reflexiones llevaron a experimentos como el de Michelson y Morley, los cuales trajeron luz a la teoría electromagnética, en especial a la consideración del éter como elemento principal del campo.

La época descrita en el inciso (a) es de suma importancia, porque, por un lado, la idea del éter dominó en el desarrollo de la teoría electromagnética, mientras que en la segunda etapa se deja atrás el éter para dar paso a una nueva concepción del campo electromagnético. Por otro lado, la visión de Faraday sobre el campo, es sostenida por algunos estudiantes universitarios hoy en día (Pocovi, C., 2002). Estas concepciones fueron agrupadas en el marco tres de estudiantes universitarios (M3u_e, p. 125), en el análisis presentado en el capítulo anterior. El marco corresponde a la necesidad de un medio de transmisión para el campo eléctrico, el cual está asociado con las líneas de fuerza.

Es importante hacer notar que la transición entre la teoría de Lorentz y la de Einstein, cuenta con varios razonamientos y experimentos que ayudaron a los científicos a establecer la teoría electromagnética. Estos razonamientos y experiencias pueden llevar a los estudiantes a comprender por qué algunas de las ideas que dominaron en la época y que ellos sostienen no son válidas, o por qué la idea de las líneas de fuerza y el éter como medios de transmisión del campo fue desechada, de tal forma que logren un mejor entendimiento del campo eléctrico y magnético, apoyando con ello el aprendizaje de

ambos conceptos.

Del trabajo de Maxwell se destaca la formulación matemática de la teoría electromagnética, y sobre todo la invariancia relativista de sus ecuaciones. Se considera a Lorentz como alguien que se aproximó a las formulaciones de Einstein.

La imagen que queda, después de la exposición del experimento de Oersted y algunos datos de la teoría de la relatividad, es, por un lado, que la relación entre la electricidad y el magnetismo es la parte fundamental de la teoría electromagnética; y por el otro, que cualquier teoría física completa, será relativísticamente invariante.

La experimentación es considerada como un elemento primordial en la fundación de la teoría electromagnética.

Lo anterior sirve de introducción al tema de "fuerzas magnéticas", como el elemento que explica los experimentos que dieron origen al electromagnetismo, y hace referencia a una relación entre los fenómenos eléctricos y magnéticos. Las fuerzas magnéticas son utilizadas para la introducción del campo magnético.

Es importante resaltar que, en esta parte, el autor hace énfasis en aspectos como la relación entre la electricidad y el magnetismo, pero no lo hace con el desarrollo del concepto de campo magnético o corriente eléctrica.

2. (analogías) Las analogías no son utilizadas por el autor en la presentación de los conceptos de campo eléctrico, magnético y corriente eléctrica.

3. (simplificaciones) El autor considera al campo magnético como una entidad real, así como lo hicieron Faraday y Maxwell, para explicar las propiedades del campo magnético:

"La gente para los que los campos eléctrico y magnético eran reales -Faraday y Maxwell, por nombrar dos- fue llevada a nuevas percepciones y grandes descubrimientos. Veamos al campo magnético tal y como ellos lo hicieron y aprendamos algunas de sus propiedades."¹⁷¹

¹⁷¹ Purcell, E., Electricity and Magnetism Berkeley Physics Course, p. 190.

Antes del párrafo anterior, el autor realiza una pregunta acerca de la realidad del campo en comparación con algunas partículas (electrones).

Al tomar la posición del campo como una realidad física, el autor limita y simplifica el concepto de campo que se le presenta al estudiante, ya que el campo como una realidad física (tal como los electrones), no es el concepto que se tiene de él hoy en día, antes bien, fue uno de los primeros conceptos sostenidos por Faraday y Maxwell y que con el tiempo evolucionaron. Aunque, el texto sólo menciona que se utilizará esta visión para aprender algunas propiedades del campo magnético, no se discute qué tan válido es esto o por qué toma esta posición y no cualquier otra para estudiar el campo magnético.

4. (cuantitativo) El capítulo que trata el **campo eléctrico** es calificado por el autor como árido, de tal forma que se sugiere acompañarlo con lecturas sobre demostraciones en electrostática. Esto nos lleva a ver que este tema presenta pocas ecuaciones, dando prioridad a la parte descriptiva.

La introducción de la **corriente eléctrica** trata aspectos importantes sobre la conducción como es el movimiento de los portadores de carga, las condiciones necesarias para que su movimiento constituya una corriente, etc. La exposición se encuentra alternada con el planteamiento de ecuaciones que describen el cálculo de los portadores, su densidad, la velocidad a la que se mueven, etc.

Al igual que sucede con el apartado de campo eléctrico, no se presentan problemas que apliquen la teoría establecida, en especial, alguna de las ecuaciones propuestas.

A diferencia de los temas anteriores, el tema de **campo magnético** presenta un ejemplo de la teoría sobre la fuerza generada en un electrón que se encuentra en uno de los dos cables por los que circula corriente en la misma dirección; explicando con ello porqué los dos cables se atraen. La importancia de este problema, radica en que el autor lo utiliza para explicar parte de la teoría que está tratando y no como un problema de otro tema o aislado del resto del texto. De esta forma, la exposición del tema queda equilibrada, y más aun, tanto las ecuaciones como el problema están integrados a la explicación del campo magnético.

5. (problemas) Como hemos visto, la resolución de problemas no es la parte central del texto. No hay problemas resueltos que ejemplifiquen la aplicación de los conceptos establecidos (sólo uno, para el caso del campo magnético), aunque al final de cada capítulo Purcell propone una serie de problemas que sirvan como ejercicio al lector.

6. (justificación) El concepto de campo eléctrico es reconocido por el autor como necesario y útil para la descripción de un sistema. Es útil en el sentido en que, dadas ciertas condiciones, se puede saber cómo será afectada una carga al ponerla en un lugar. Tanto la corriente eléctrica como el campo magnético quedan unidos a través de los fenómenos de inducción y son expresados como elementos fundamentales de los fenómenos magnéticos.

El autor, hace notar al lector que los tres conceptos (campo eléctrico y magnético y corriente eléctrica) son la base de las experiencias que llevaron a la construcción de la teoría electromagnética, y que de esto se puede dar cuenta al estudiar cada uno de los fenómenos que son expuestos a lo largo del texto.

7. (relación) Debido a que el campo eléctrico es el primer tema del que se ocupa el texto, en principio no lo relaciona con los otros dos conceptos. Sin embargo, en el modelo de conducción propuesto por el autor queda explícita la relación existente entre la corriente y el campo eléctrico. Dicha relación consiste en que al aplicar un campo eléctrico a una sustancia particular, éste ejerce una fuerza en cada portador de carga. El movimiento de las cargas, dependerá del tipo de sustancia a la que se haya aplicado el campo. Así, si no hay campo eléctrico aplicado, los portadores se moverán al azar con velocidades que dependen de su temperatura.

En el primer punto, en el que se analizaron los antecedentes históricos utilizados por el autor, se hizo notar la importancia que da a la relación entre los fenómenos eléctricos y magnéticos. Comenzando por la relación entre la corriente eléctrica y la formación del campo magnético alrededor del cable, hasta la dependencia de los campos eléctrico y magnético, resaltada por la teoría de la relatividad.

Conforme va avanzando el curso, el autor va construyendo la teoría electromagnética, introduciendo nuevos conceptos, e integrando los que ocupan los primeros capítulos del texto, tal y como son el campo y la corriente eléctrica.

8. (experimentación) El concepto de campo eléctrico es introducido a partir de un experimento pensado; que consiste en un arreglo de cargas estáticas puntuales y la fuerza que ejerce sobre una carga de prueba (es la única experiencia presente en el apartado de campo eléctrico).

El autor menciona que la experimentación fue de suma importancia para el establecimiento de las propiedades del campo eléctrico. Hay que recordar que recomienda a los profesores, al inicio del libro, realizar clases con demostraciones en electrostática.

Al igual que el tema de campo eléctrico, el de corriente eléctrica no presenta ningún experimento del cual se valga el autor para explicar el fenómeno o ejemplificarlo.

Para la introducción del campo magnético, el autor se vale de distintos experimentos, algunos de los cuales se ilustran en el texto. Ejemplos de ellos, son la fuerza que ejercen dos cables por los que viaja corriente en una dirección y en direcciones opuestas, la deflexión de la aguja de una brújula debido al paso de una corriente (descubrimiento de Oersted), y la semejanza entre la aguja de la brújula y una bobina. El experimento sobre las fuerzas que ejercen entre sí cables por los que circula corriente en una dirección es utilizado por el autor para dar una explicación amplia sobre las fuerzas magnéticas y sus efectos sobre los portadores que circulan a lo largo del cable conductor. Los experimentos mostrados por el autor, relacionados con el campo magnético, son utilizados para explicar distintos fenómenos y conceptos, así como el porqué de las observaciones que se registran.

A lo largo de estos ocho puntos, se puede observar que el autor se preocupa porque la exposición de los temas sea completa, en el sentido en que trata de establecer un equilibrio entre la exposición de los conceptos y las ecuaciones; de la misma forma que utiliza experiencias para tratar los fenómenos magnéticos. La historia también es utilizada por el autor para resaltar la importancia entre la electricidad y el magnetismo.

En el caso de la historia, existen elementos que puede utilizar con el fin de mejorar algunos de los problemas conceptuales presentes en los estudiantes, como vimos en el punto uno. A través de la historia también se pueden resaltar puntos importantes como los cambios que sufrió el concepto de campo así, como las condiciones que los produjeron.

9. (ideas previas) Algunas de las ideas previas de estudiantes universitarios presentadas en el apartado 5.4.3. del capítulo anterior, se ven reforzadas con el tratamiento que hace Purcell sobre campo eléctrico. Algunas de estas concepciones son:

c1_e. Para que exista un campo eléctrico, debe haber una fuerza actuando sobre una carga.

c4_e. Los campos eléctricos son producidos por una carga puntual estática.

c6_e. La intensidad del campo eléctrico y/o magnético depende de la carga que lo produce.

c8_e. Si una carga es colocada en un campo eléctrico, éste ejercerá una fuerza sobre ella, ocasionando que se mueva.

Estas concepciones se ven influenciadas directamente por la introducción del campo eléctrico como un efecto que sentirá una carga de prueba si es colocada cerca de un arreglo de cargas eléctricas estáticas. De esta forma, los estudiantes sólo identifican al campo eléctrico por medio de fuerzas ejercidas sobre cargas.

La segunda consecuencia de este tratamiento, es que se relacione al campo eléctrico y magnético, así como la generación de estos, con cargas puntuales estáticas (c4_e, c6_e, c8_e).

Como otra consecuencia, se tiene la consideración que los estudiantes hacen del campo como una esfera de influencia, en el que toda carga sentirá una fuerza (M1u). Las ideas que han sido incluidas dentro de este marco, se ven reforzadas, por un lado, por la forma en que Purcell presenta el campo eléctrico, y por otro lado, por el experimento de Oersted, el cual es enfatizado por el autor, al principio del capítulo de campo magnético. Este experimento da cuenta del campo magnético generado alrededor de un alambre por el que circula una corriente eléctrica y los efectos que produce en una brújula:

"Decimos que una corriente eléctrica tiene asociado con ella un campo magnético que permea el

espacio circundante. Cualquier otra corriente eléctrica, o cualquier partícula cargada en movimiento que se encuentre en este campo, experimenta una fuerza proporcional a la magnitud del campo magnético en esa localidad.¹⁷²

La visión de Faraday sobre las líneas de fuerza, ha sido encontrada entre estudiantes universitarios. Algunas de las concepciones citadas en la sección 5.4.3. del capítulo anterior, son:

c9. La fuerza que ejerce el campo eléctrico, sólo será sentida por la partícula si ésta se encuentra sobre una línea de fuerza.

c12. Por cualquier punto de un campo eléctrico se puede hacer pasar una línea de fuerza, de tal forma que una fuerza es ejercida sobre una carga en cualquier punto del campo.

Dado el texto expone de forma breve las líneas de campo, no es posible que este ayude a cambiar la concepción de los estudiantes. De acuerdo con Pocovi (2002), "podemos especular en lo que tal vez lleve a algunos estudiantes a pensar sobre las líneas de fuerza como entidades materiales. En los libros de texto utilizados por los estudiantes, el estatus geométrico de las líneas sólo es mencionado brevemente. Los dibujos utilizados para representar estas líneas, consiste en líneas sólidas y aun en el laboratorio se dibuja estas líneas como perpendiculares a las equipotenciales medidas."¹⁷³

Conforme va avanzando el texto, el autor va estableciendo más propiedades tanto del campo eléctrico como del magnético, transformando la visión que estableció al principio del campo, como un lugar en donde las cargas sentirán ciertos efectos, a una entidad independiente. Esta entidad, es la mediadora de las interacciones entre partículas. Lo anterior, puede ayudar a los estudiantes a ir cambiando su concepción del campo como una esfera de influencia al de una entidad independiente. Hay que recordar que el último punto en la evolución del concepto de campo, es la consideración de este como una entidad independiente, en el sentido que posee momento y energía y es indispensable para la descripción de los fenómenos electromagnéticos.

¹⁷² Purcell, E., Electricity and Magnetism Berkeley Physics Course, p. 150.

¹⁷³ Pocovi, C. & Finley, F., Lines of force: Faraday's and students' views, p. 472.

Por lo que respecta a la corriente eléctrica, la teoría de electrones que presenta Purcell, puede ayudar a cambiar algunas de las concepciones de los estudiantes:

- c1.** La corriente es un flujo de electrones.
- c2.** La corriente eléctrica es energía.
- c3.** La corriente está formada de partículas en movimiento.
- c4.** Hay dos tipos de corriente: positiva y negativa.

Las cuatro concepciones anteriores, dan cuenta de la naturaleza de la corriente, la cual, es establecida en el texto claramente como el "movimiento de portadores de carga". Purcell menciona también otras características de los portadores, como que pueden ser positivos o negativos, aclarando así la primera concepción .

La exposición del modelo de conducción puede ayudar a cambiar las siguientes concepciones:

- c7.** La corriente deja la batería por una terminal y regresa a ella por la terminal contraria.
- c8.** La corriente sale de los dos polos de la batería hacia los elementos del circuito.
- c9.** La corriente viaja a la velocidad de la luz.
- c10.** La batería transfiere cargas almacenadas que conforman la corriente a los elementos del circuito.

De acuerdo con el modelo propuesto por el autor, un campo eléctrico ejerce una fuerza sobre los portadores de carga, lo cual les produce una aceleración, contraponiéndose así al conjunto anterior de concepciones. Las concepciones 7, 8 y 10 expresan que los electrones son brindados por la batería hacia el resto del circuito. En el modelo de exposición el autor sugiere una primera aproximación, un medio con igual número de portadores de carga, y , en una segunda, indica que los portadores de carga en el caso de los metales son los electrones, los cuales se encuentran en el material, no en la batería.

5.2.7. Halliday, D., Resnick, R. & Krane, K., Física vol. 2

El capítulo de **Campo Eléctrico** comienza con una introducción sobre los campos de temperatura, presión y flujo. Citando el párrafo introductorio tenemos:

"La temperatura tiene un valor definido en cada punto del salón en el que usted debe estar sentado. Podemos medir la temperatura en cada punto colocando un termómetro en ese punto, y podríamos entonces representar la distribución de las temperaturas...con una función matemática, digamos $T(x,y,z)$, o bien con un gráfico trazando la variación de T . Tal distribución de temperaturas se llama campo de temperaturas. De igual forma podríamos medir la presión en distintos puntos en el seno de un fluido y así obtener la representación del campo de presión, describiendo la variación espacial de la presión."¹⁷⁴

El párrafo anterior indica las siguientes propiedades del campo:

1. En el caso del campo de flujo, se encuentra presente en el fluido que lo contiene, mientras que en el campo de temperaturas queda contenido en la habitación llena de aire.
2. Es una entidad relacionada con el aire o el líquido en el caso de los campos de temperatura o flujo respectivamente. De esta forma, el campo está asociado a algo material que lo contiene.

Tras la introducción sobre los campos, los autores hacen énfasis en la existencia de campos estáticos y campos dependientes del tiempo.

Inmediatamente, presentan la descripción del campo gravitatorio, haciendo referencia a la definición de éste hecha en un capítulo anterior, como:

$$\vec{g} = \frac{\vec{F}}{m_0} \quad \dots (4)$$

El campo gravitatorio es: uniforme, estático (siempre que la distribución de masa sea uniforme y por lo tanto g será constante para todos los puntos) y vectorial. Ya que se tienen estas características y la definición de g , los autores proceden a explicar cómo medir el campo gravitatorio utilizando la ecuación 4.

Durante esta parte introductoria sobre la existencia de distintos tipos de campos, los

¹⁷⁴ Halliday, D., Resnick, R. & Krane, K. Física Vol. 2, p. 15.

autores se limitan a dar las características de los campos haciendo énfasis en la medición de estos. La forma en que la definición del campo gravitatorio y sus características, son utilizados para definir el campo eléctrico, se verá con detalle en el punto 2 del análisis.

Se define el campo eléctrico en analogía con la definición del campo gravitatorio (ec. 4):

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} \quad \dots (5)$$

Para terminar el apartado, se presenta una corrección hecha a la ecuación anterior, con base en la similitud entre la medición del campo eléctrico y la del campo gravitatorio. Esta corresponde a que se debe medir el campo por medio de la fuerza en una carga tan pequeña que no perturbe el campo de las cargas que se trata de medir:

$$\vec{E} = \lim_{q_0 \rightarrow 0} \frac{\vec{F}}{q_0} \quad \dots (6)$$

Ahora bien, el límite anterior es presentado como "inexistente" debido a la cuantización de la carga, por lo que q_0 nunca puede ser menor que e , y por lo tanto no puede tender a cero. Finalmente se aclara que la ecuación 6 no es necesaria para calcular el campo de un arreglo de cargas.

Dentro del capítulo de campo eléctrico, sólo se presenta el campo producido por una carga puntual, y un arreglo de cargas puntuales (distribución de carga continua), siendo que el campo en ambos casos es estático.

Un elemento de gran importancia dentro del desarrollo del concepto de campo, es el de las **líneas de fuerza**, introducido por Faraday. El texto menciona que en la actualidad las líneas de fuerza no son utilizadas en el sentido en el que Faraday lo hacía:

"Si bien a estas líneas ya no asociamos la misma clase de realidad que Faraday, continúan proporcionándonos un modo conveniente e instructivo de representar el campo eléctrico, por lo que las usaremos en ese sentido."¹⁷⁵

De acuerdo con lo anterior, se les asignan algunas propiedades a las líneas de fuerza; un ejemplo de ello, es que dan la dirección del campo en cualquier punto. También se indica

¹⁷⁵ Halliday, D., Resnick, R. & Krane, K., Física Vol. 2, p.20.

la forma de interpretar un arreglo de líneas de fuerza, dependiendo de la dirección, y el número de líneas por unidad de área.

El texto empieza describiendo lo que es un **campo magnético** de la siguiente manera:

“Describimos al espacio alrededor de un imán permanente o de un conductor que conduce corriente como el lugar ocupado por un campo magnético.”¹⁷⁶

El campo magnético es presentado a través de las semejanzas que guarda con el campo eléctrico. La tabla siguiente resume la analogía establecida en el texto entre los campos eléctrico y magnético establecida por los autores:

Campo eléctrico	Campo magnético
Las líneas de campo eléctrico se trazan de modo que la tangente a cualquier línea da la dirección de \vec{E} .	Las líneas de campo magnético se trazan de modo que la tangente a cualquier línea da la dirección de \vec{B} .
La fuerza eléctrica es paralela a las líneas de \vec{E} .	La fuerza magnética es perpendicular a las líneas de \vec{B} .
Las líneas de \vec{E} siempre empiezan en una carga y terminan en otra.	Las líneas de \vec{B} forman anillos cerrados.

De aquí que el texto no presente un concepto de campo magnético, sino sólo sus semejanzas y diferencias con el campo eléctrico.

Finalmente, al igual que se hizo para el campo eléctrico, se propone un procedimiento para determinar si hay un campo magnético presente en cierta región del espacio.

La imagen de campo magnético, después de la descripción realizada por el autor, es que corresponde al espacio alrededor de un imán, y que guarda algunas semejanzas con el campo eléctrico.

Los autores comienzan el capítulo dedicado a la **corriente eléctrica** explicando que los electrones libres de un conductor se mueven de manera aleatoria, es decir no existe un movimiento hacia una dirección en particular:

“Ya sea que el conductor.. esté cargado o descargado, no existe ningún flujo neto de carga en su interior. En ausencia de un campo aplicado externamente, no existe un campo eléctrico dentro del

¹⁷⁶ Halliday, D., Resnick, R. & Krane, K., Física Vol. 2, p. 159.

volumen del conductor o paralelo a su superficie. Aun cuando un gran número de electrones de conducción se halla disponible, no existe fuerza alguna sobre los electrones ni tampoco un flujo neto de carga."¹⁷⁷

Por un lado, el párrafo anterior hace referencia a un **flujo de carga** -aunque el autor no quiera decir que la corriente es un fluido-. Como vimos en el capítulo anterior esta es la imagen que la mayoría de los estudiantes tienen sobre la corriente eléctrica y que corresponde a la corriente eléctrica como un **fluido**. Por otro lado, los autores mencionan los electrones de conducción sin previa explicación o referencia a otro capítulo del mismo libro.

Ya hacia el final del párrafo, se hace explícita la necesidad de una fuerza que mueva los electrones en una dirección dada y no de manera aleatoria; introduciendo a la pila como un elemento necesario para mantener una diferencia de potencial que forme un campo eléctrico. Entonces el campo actúa sobre los electrones y les da un movimiento en sentido opuesto a E .

La corriente eléctrica queda definida en el siguiente párrafo:

"Si a través de cualquier superficie pasa una carga neta dq en un intervalo de tiempo dt , decimos que se ha establecido una corriente eléctrica i , en donde: $i = dq/dt$."¹⁷⁸

Dentro de este capítulo (32), los autores sólo tratan las corrientes que son constantes en el tiempo. De la misma forma, se concentran en el estudio de los electrones que se mueven en conductores sólidos. Para ello, establecen una analogía entre el flujo de un fluido incompresible en una tubería sin considerar fuentes o sumideros, el uso de esta analogía se detallará en el punto 2 del análisis.

La **corriente de desplazamiento** es mencionada dentro del capítulo de las ecuaciones de Maxwell. Esta corriente, de acuerdo con los autores, puede crear un campo magnético, al igual que lo hace la corriente de conducción. En este sentido (creación de campo magnético), la corriente de desplazamiento es similar a la de conducción, pero, hay que resaltar que la primera *no implica un movimiento de carga*.

¹⁷⁷ Halliday, D., Resnick, R. & Krane, K., Física vol. 2 , p. 117.

¹⁷⁸ Ibidem , p. 117.

Lo anterior puede generar una confusión, debido a que aunque ambos tipos de corriente sean totalmente diferente de acuerdo con el texto, tienen una propiedad en común: la generación de un campo magnético. Aunado a esto, el autor no se detiene a explicar porqué ambas pueden generar un campo magnético, aunque sean distintas entre sí.

“En la figura... entra una corriente de conducción i en la placa positiva y sale por la placa negativa. Esta corriente de conducción no es continua en el espacio entre las placas del capacitor porque por este espacio no pasa ninguna carga. Sin embargo la corriente de desplazamiento i_d en el espacio prueba ser exactamente a i , conservando así el concepto de la continuidad de la corriente.”¹⁷⁹

La corriente de desplazamiento queda expresada como *necesaria* para la continuidad de la corriente. La falta de un elemento en las ecuaciones de Maxwell, es el argumento que la mayoría de los libros utiliza para presentar la corriente de desplazamiento, sin hacer referencia a su naturaleza. Por lo tanto, no queda expresado de forma explícita el porqué se considera una corriente; tomando en cuenta que su posición como ya lo mencioné anteriormente es que la corriente es un flujo de cargas.

Es importante mencionar que la ecuación correspondiente a la corriente de desplazamiento es introducida algunos apartados anteriores junto con las ecuaciones de Maxwell.

El análisis del texto, queda condensado en los siguientes puntos:

1. (historia) Los autores no hacen uso de antecedentes históricos para introducir ninguno de los conceptos.

2. (analogías) Para la presentación del campo eléctrico y la corriente eléctrica, los autores hacen uso de dos analogías.

En primer lugar, el **campo eléctrico** es presentado comparándolo con el campo gravitatorio y sus propiedades. Ya que el concepto de campo gravitatorio, se ha visto en capítulos anteriores, el objetivo de los autores es que a partir de la teoría gravitatoria ya establecida, el lector pueda generar una teoría de campo. El aspecto principal que sirve de punto de partida para establecer la semejanzas entre el campo gravitatorio y el eléctrico es la acción a distancia. Esta forma de acción, es introducida como una forma

¹⁷⁹ Halliday, D., Resnick, R. & Krane, K., Física Vol. 2, p. 301.

de acción directa e instantánea utilizada antes de que el concepto de los campos fuera ampliamente aceptado; implicaría una interacción, desde el punto de vista gravitatorio, entre dos masas. Debido a que la acción a distancia va en contra de la teoría especial de la relatividad (nada puede viajar más rápido que la luz), la interacción no es entre las masas directamente, antes bien, la interacción entre ellas es mediada por el campo.

La descripción del campo gravitatorio es "traspasada directamente a la electrostática"¹⁸⁰; dando como resultado que el campo eléctrico entre dos cargas es un "intermediario" de la interacción entre ellas:

"...la primera carga establece un campo eléctrico, y la segunda carga interactúa con el campo eléctrico de la primera carga. Nuestro problemas de determinar la interacción entre las cargas se reduce por tanto a dos problemas por separado: (1) determinar, por medición o cálculo el campo eléctrico establecido por la primera carga en cada punto del espacio, y (2) calcular la fuerza que el campo ejerce sobre la segunda carga situada en un punto particular en el espacio."¹⁸¹

En el resumen de la presentación de los tres conceptos, se puede apreciar, cómo las ecuaciones de campo son expresadas en analogía a la ecuación del campo de gravedad (ec. 4). Es de notarse, que los autores no se detiene a establecer los límites de la analogía entre el campo eléctrico y el gravitatorio.

La analogía utilizada en el tema de **corriente eléctrica**, corresponde a aquella que existe entre el comportamiento de una corriente eléctrica en un circuito eléctrico y el flujo de agua en una tubería, sin tomar en cuenta sumideros ni fuentes.

La comparación entre el flujo de un fluido y la corriente eléctrica, sirve para establecer la forma en que se comporta la corriente eléctrica en un circuito, dependiendo de la sección transversal de los conductores (la corriente es la misma en todas las secciones transversales de un conductor). No se brindan razones evidentes sobre la validez de la relación entre el flujo de un fluido y la corriente eléctrica. De igual forma, no se da una explicación al estudiante de porqué no se puede aplicar la analogía a otras propiedades de la corriente, o qué otros aspectos pueden ser similares de los dos fenómenos analizados.

¹⁸⁰ Halliday, D., Resnick, R. & Krane, K. Física Vol. 2, p. 16.

¹⁸¹ Idem.

3. (simplificaciones) Los tres conceptos son presentados de manera simplificada. En primer lugar, el concepto de **campo eléctrico** es traspasado directamente de la teoría gravitatoria, sin discutir los detalles sobre qué tan válido es hacer esto, o porqué se puede establecer la comparación entre el campo gravitatorio y el eléctrico. Como consecuencia, no se estudia el concepto por sí mismo, y queda como una copia del concepto de campo de gravedad. Aunado a ello, se da prioridad a la medición del campo y con ello al cálculo de la fuerza ejercida sobre una partícula por éste.

El campo eléctrico se ve reducido a dos problemas, su medición y el cálculo de la fuerza que produce.

La **corriente eléctrica**, es simplificada, en cuanto a que no se profundiza en un modelo de conducción, o en detallar el fenómeno de manera microscópica. Sólo se dan características macroscópicas, por ejemplo, que al medir la corriente en distintos puntos de un circuito se verá que es la misma. Otra de las simplificaciones, son los dibujos presentados en esta sección. En ellos, se puede observar a los electrones representados por pequeños círculos perfectamente alineados moviéndose a lo largo de un conductor en forma de cilindro. Este esquema, ayuda a que los estudiantes vean a la corriente eléctrica como un grupo de electrones formados moviéndose en orden a través del conductor.

El **campo magnético**, es reducido al espacio alrededor de un imán, así como a un concepto que presenta diferencias y similitudes con el campo eléctrico. A pesar de que en el texto queda señalado que una corriente eléctrica o carga en movimiento genera un campo magnético, no se le da mucha importancia a este hecho; sino hasta el momento en el que se quiere obtener la ecuación de la fuerza de un campo magnético sobre una partícula (fuerza de Lorentz).

4. (cuantitativo) Se puede decir, que los tres conceptos son descritos a través de ecuaciones.

5. (problemas) De los puntos 3 y 4 se tiene, que los conceptos están simplificados básicamente a cantidades que se pueden medir; por lo que, las ecuaciones con las que

se han descrito, son aplicadas de forma inmediata a problemas. Los problemas resueltos, constituyen un ejemplo de la forma en que se utilizan las ecuaciones. Así, el problema en el que se aplica la ecuación (4), está dedicado a encontrar la magnitud y dirección de un campo eléctrico, dada la fuerza que actúa sobre un protón. En el tema de corriente eléctrica los problemas están relacionados a la aplicación de la ecuación que describe la densidad de corriente. Los problemas que tratan sobre el campo magnético, están enfocados a describir la fuerza del campo magnético sobre un protón.

6. (justificación) La presentación de los conceptos no es justificada por el autor.

7. (relación) El fenómeno de corriente eléctrica es presentado de forma aislada del tema de campo eléctrico y magnético. Sin embargo, hemos visto que se trata de articular o relacionar los campos eléctrico y magnético a través de las semejanzas y diferencias entre ambos.

8. (experimentación) El texto no se vale de experimentos que ayuden en la exposición de los conceptos.

9. (ideas previas) La influencia que tiene el texto sobre las concepciones de los estudiantes, se puede ver en varias ocasiones.

En cuanto al tema de **campo eléctrico**, no puede ayudar a modificar las siguientes concepciones de los estudiantes:

c1_e. Para que exista un campo eléctrico, debe haber una fuerza actuando sobre una carga.

c8_e. Si una carga es colocada en un campo eléctrico, éste ejercerá una fuerza sobre ella, ocasionando que se mueva.

Estas dos concepciones, representan el hecho de que los estudiantes piensan en fuerzas entre cargas puntuales estáticas siempre que se habla del campo. Dado que el texto presenta el campo a través de la fuerza que ejerce sobre una partícula, y es la situación que predomina en la presentación del campo, no puede ayudar a modificar estas

concepciones.

Otro grupo de concepciones, es aquel en el que los estudiantes ligan al campo sólo con cargas puntuales, o a una corriente eléctrica:

c4. Los campos eléctricos son producidos por una carga puntual estática.

c5. Un campo eléctrico o magnético puede ser producido por una corriente eléctrica.

En el resumen de la presentación del campo eléctrico, se puede observar, que sólo se utilizan situaciones estáticas para hablar de campo eléctrico, sin hacer referencia a situaciones dinámicas. Por lo tanto, el estudiante sólo puede relacionar al campo eléctrico con situaciones estáticas.

Por último, se tiene el grupo de concepciones que se refieren a las líneas de fuerza (c9_e - c12_e, sección 5.4.3.). Hay que recordar que este grupo de concepciones, representan básicamente la visión que poseía Faraday sobre las líneas de fuerza. Aunque los autores mencionan que esta no es la visión que se tiene de ellas ahora, no se detienen a discutir cómo se dio el cambio en dicha visión.

La concepción de **corriente eléctrica** que se maneja en el texto, no puede ayudar a modificar las siguientes concepciones de los estudiantes:

c1. La corriente eléctrica es un flujo de electrones.

A lo largo del capítulo que trata sobre la corriente eléctrica, se hace referencia continuamente a la palabra **flujo** para referirse ella -aunque el autor no quiera decir con ello, que la corriente es un fluido-. Aunado a ello, se utiliza la analogía entre el flujo de un fluido en una tubería y la corriente eléctrica, sin enfatizar las diferencias entre cada sistema. Estos dos aspectos pueden ayudar a reforzar la concepción de la corriente como un fluido.

c4. Hay dos tipos de corriente: positiva y negativa.

c5. La corriente eléctrica es gastada por los elementos del circuito.

c8. La corriente sale de los polos de la batería hacia los elementos del circuito.

Este grupo de concepciones forman parte de los marcos que describen el comportamiento de la corriente en un circuito. Hay que notar que los autores no exponen un modelo del comportamiento de la corriente en un circuito. Por esta razón, el lector no puede confrontar su modelo con el propuesto por el texto, lo cual, le ayudaría a acercarse a un modelo de corriente aceptable desde el punto de vista científico.

5.2.8. Física vol. II Campos y Ondas, Alonso, M. & Finn, E.

"Cualquier región del espacio en donde una carga eléctrica experimenta una fuerza se llama campo eléctrico."¹⁸²

La definición anterior, es el inicio del apartado de **campo eléctrico** del libro Física vol. II Ondas y Campos, presentado en el primer capítulo. La fuerza que será ejercida sobre la carga eléctrica, es resultado de la presencia de otras cargas colocadas en la región del espacio.

Al igual que lo hace Purcell en su libro Electricity & Magnetism, se introduce el campo eléctrico como el resultado de la interacción entre un arreglo de cargas y una carga de prueba que es acercada al arreglo original. Así, el arreglo ejerce sobre la carga de prueba una fuerza. Y el campo eléctrico queda definido como la fuerza por unidad de carga colocada en un punto dado:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \quad \dots (7)$$

Los autores expresan que el campo mueve las cargas, en sentido contrario a éste si la carga es negativa, y en el mismo sentido del campo si la carga es positiva. Igualmente, menciona el efecto de polarización: la separación de cargas positivas y negativas debido a la presencia de un campo eléctrico.

¹⁸² Alonso, M. & Finn, E., Física vol. II Ondas y Campos, p. 462.

Las **líneas de fuerza**, como las líneas tangentes a la dirección del campo en cada punto, son introducidas por los autores como una forma de representar el campo eléctrico de manera semejante que se hace con el campo gravitacional. De esta forma, tomando en cuenta una carga estática, las líneas de fuerza son rectas que pasan por el centro de la carga.

Es importante mencionar que hasta este punto del análisis, hemos podido observar la utilización indistinta de los términos "**Líneas de fuerza**" y "**Líneas de campo**" en los libros revisados; y es algo que se cumple para los diez textos elegidos.

El segundo capítulo del libro, lo dedican al **magnetismo e interacciones magnéticas**. El magnetismo es introducido como la interacción entre el imán y trozos de hierro, que había sido observada ya desde tiempos antiguos. Hay que recordar que el magnetismo surgió muchos años antes de Cristo y que fue la base para el estudio de los campos magnéticos. Como lo hicieron los científicos del siglo XIX, los autores establecen de inmediato la relación entre las interacciones eléctricas y magnéticas: "el magnetismo es un efecto del movimiento de las cargas eléctricas."¹⁸³

El **campo magnético** es introducido haciendo referencia a los campos gravitacional y eléctrico:

"Puesto que observamos interacciones entre cuerpos magnetizados, podemos decir, por analogía con los casos gravitacional y eléctrico, que un cuerpo magnetizado produce un **campo magnético** en el espacio que lo rodea. Cuando colocamos una carga eléctrica en reposo en un campo magnético, no se observa la misma fuerza o interacción especial alguna; pero cuando una carga eléctrica *se mueve* en una región donde hay un campo magnético, se observa una nueva fuerza sobre la carga además de las debidas a sus interacciones gravitacional y eléctrica."¹⁸⁴

Atendiendo al párrafo anterior, se define entonces la fuerza que sufre la carga en movimiento dentro de un campo magnético:

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad \dots (8)$$

Las indicaciones que se hacen sobre la relación anterior, son sólo de tipo matemático.

¹⁸³ Alonso, M. & Finn, E., Física vol. II Ondas y Campos, p. 512.

¹⁸⁴ Ibidem, p. 513.

Al igual que en los textos anteriores, las páginas dedicadas a la **corriente eléctrica** se encuentran entre las correspondientes al campo eléctrico y campo magnético. Sin embargo, es importante decir que la corriente eléctrica es presentada, atendiendo a una necesidad. Ya que los autores se encuentran tratando temas como el de estructura eléctrica de la materia y las relaciones energéticas en un campo eléctrico; por lo tanto, para lograr sus objetivos, introducen el tema de corriente eléctrica. Lo anterior a diferencia de lo realizado en los demás libros de texto, en el que le es designado un capítulo a la corriente eléctrica y es acompañada de circuitos eléctricos. La **corriente eléctrica** queda definida de la siguiente manera:

“Una corriente eléctrica consiste en un chorro de partículas cargadas o iones. Esta definición es aplicable a los iones en un acelerador de cualquier clase, a los de una solución electrolítica, a los de un gas ionizado o plasma, o a los electrones en un conductor metálico. A fin de que se produzca una corriente eléctrica, debe aplicarse un campo eléctrico para mover las partículas cargadas en una dirección determinada.”¹⁸⁵

En la definición anterior, los autores intentan generalizar la corriente, es decir, no sólo definirla como un movimiento de electrones, sino como un movimiento de partículas cargadas. La **intensidad de corriente eléctrica**, queda definida como el número de cargas que pasan por unidad de tiempo por la sección transversal de un conductor.

A diferencia de otros textos analizados, la corriente eléctrica no se liga al problema de circuitos eléctricos de forma inmediata, ya que, los autores consideran que los circuitos son un problema de aplicación.

La **corriente de desplazamiento**, “es simplemente una correlación entre **E**, **B** y **J**, en el mismo punto del espacio.”¹⁸⁶ Donde **E**, es el vector que designa el campo eléctrico, **B** el campo magnético y **J** la densidad de corriente. Por esta razón, los autores establecen que la imagen de Maxwell sobre la corriente de desplazamiento es innecesaria, y el término “corriente de desplazamiento” puede llevar a confusiones.

El análisis del texto, queda condensado en los siguientes puntos:

¹⁸⁵ Alonso, M. & Finn, E., Física vol. II Ondas y Campos , p. 489.

¹⁸⁶ Ibidem, p. 680.

1. (historia) El texto no presenta antecedentes históricos.
2. (analogías) Los autores no utilizan analogías para presentar los conceptos.
3. (simplificaciones) El concepto de campo eléctrico, tal y como es presentado por Alonso & Finn, queda expresado en función de una cantidad medible y los efectos que se pueden observar. Esto sucede también en la introducción del campo magnético; los autores mencionan que cuando una partícula se mueve en un campo magnético, "se observa" una nueva fuerza sobre la carga; entonces, el campo magnético queda descrito a través de un fenómeno que se puede observar.

En el tema de corriente eléctrica, se presentan varios aspectos que contribuyen a que la teoría quede expuesta de manera simplificada. En primer lugar, la falta de un modelo microscópico que describa la corriente eléctrica, no permite que los estudiantes tengan un panorama completo del fenómeno de conducción, tomando en cuenta todos los aspectos que intervienen en él: el campo eléctrico, los elementos resistivos, etc.

En segundo lugar, los gráficos que ilustran el movimiento de las partículas cargadas positivas y negativas, dan la impresión de que el movimiento se realiza de forma ordenada, es decir, las partículas se desplazan sin chocar y bien alineadas. Gráficos como estos, influyen en las concepciones de los estudiantes, debido a que muchos de ellos, no consideran los choques que pueden existir entre las partículas, dentro de su modelo de conducción. (Lee & Law, 2001).

4. (cuantitativo) En el resumen de la presentación de los tres conceptos, se puede apreciar que el trato que se le da a los temas no es cualitativo. Para los tres conceptos se obtienen las relaciones matemáticas a partir de las situaciones presentadas -el arreglo de cargas en el caso del campo eléctrico y la fuerza que siente una partícula en movimiento situada en un campo magnético-, sin profundizar en los conceptos.

La corriente eléctrica es tratada de forma meramente cuantitativa. Algunos elementos que conforman el modelo de corriente eléctrica son vistos de forma poco detallada, como el

movimiento de los electrones dentro del cable conductor.

5. (problemas) Los problemas sugeridos por los autores después de la introducción del campo eléctrico, corresponden, en primer lugar, a calcular el campo eléctrico producido por un arreglo de dos cargas, y , en segundo, a la descripción del movimiento de una partícula cargada positivamente en un campo eléctrico.

En el tema de campo magnético, uno de los problemas propone calcular la fuerza que siente una partícula al entrar a un campo magnético, y el segundo discute el efecto Hall. La discusión del efecto Hall, explica las fuerzas que sufren las partículas de una placa por la que circula corriente, que es colocada en un campo magnético.

La corriente eléctrica ha sido introducida como un complemento necesario, sin dar ejemplos precisos o una aplicación inmediata.

6. (justificación) Los autores no proveen una justificación a la introducción de los conceptos, antes bien, los campos magnético y eléctrico quedan como una herramienta que sirve para describir el comportamiento de partículas, o la interacción entre ellas.

La corriente eléctrica es introducida como un concepto necesario para complementar un ejemplo. El ejemplo consiste en la descripción del funcionamiento de un acelerador electrostático. Con ello, la importancia que tiene la corriente por sí misma, se pierde un poco, al ser expresada por el autor como un concepto complementario para la explicación de una aplicación de la electrostática.

7. (relación) Los tres conceptos, son tratados de forma aislada. La única relación que hace el autor durante la exposición del campo eléctrico, campo magnético o corriente eléctrica, es, como se mencionó en el punto anterior, aquella existente entre la corriente eléctrica y el funcionamiento del acelerador electrostático.

8. (experimentación) El autor no toma en cuenta aspectos experimentales que puedan ayudar a la comprensión de los conceptos. Se basa en un arreglo de cargas puntuales

estáticas para el caso del campo eléctrico, y una partícula que se mueve en un campo magnético, en el caso del campo magnético.

9. (ideas previas) De los ocho puntos anteriores, se puede observar que el texto no puede ayudar a resolver algunos de los problemas conceptuales de los alumnos. En el caso de las concepciones relacionadas con los conceptos de campo eléctrico y magnético, el texto no puede ayudar a modificar aquellas citadas en la sección 5.4.3. del capítulo anterior. Los tres problemas o marcos conceptuales que representan estas concepciones, corresponden a:

a. La relación que hacen los estudiantes entre el campo y las cargas. Esto es, ligan la presencia de cargas con la existencia de los campos eléctrico y magnético. El texto no puede ayudar a que los estudiantes modifiquen las concepciones que quedan contenidas dentro de este marco, debido a que no presenta situaciones en las que un campo no se relacione con una carga puntual estática directamente, como sería el caso de una distribución de carga. Esto puede provocar que los estudiantes se queden con la impresión de que sólo puede haber un campo eléctrico si hay una carga puntual estática presente.

b. El que los estudiantes consideren a los campos eléctrico y magnético una “esfera de influencia”, donde las cargas sentirán fuerzas; es un problema conceptual que, con la forma en que Alonso & Finn definen ambos conceptos, no puede ayudar a resolver este problema. Esto se debe a que ambos campos están definidos como un espacio alrededor, ya sea de un imán en el caso del campo magnético, o de cargas electrostáticas en el caso del campo eléctrico, en el que si se sitúa una carga, ésta sentirá los efectos provocados por el campo.

c. Los estudiantes consideran que el campo eléctrico necesita un medio de transmisión. Este problema conceptual, no es discutido por el autor. Cuando se introduce el concepto de campo eléctrico, no se expresa si las características corresponden a un campo en el vacío o en algún medio. De esta forma, el estudiante no puede confrontar las concepciones que quedan encerradas dentro de este marco –el papel de las líneas de

fuerzas como conductoras de las acciones eléctricas-, debido a que el libro no trata estos aspectos.

Es importante mencionar, que las líneas de fuerza no son discutidas ampliamente, por lo que las concepciones que los estudiantes poseen sobre este tema (c9_e – c12_e, sección 5.4.3.) , tampoco pueden ser modificadas mediante el uso del libro.

Las concepciones de los estudiantes sobre la corriente eléctrica forman tres marcos. Estos describen los modelos que dan cuenta del comportamiento de la corriente en un circuito eléctrico. La presentación que hace el texto sobre el tema puede ayudar a modificar algunas de las concepciones de los estudiantes:

c7. La corriente deja la batería por una terminal y regresa a ella por la terminal contraria.

c8. La corriente sale de los dos polos de la batería hacia los elementos del circuito.

c10. La batería transfiere cargas almacenadas que conforman la corriente a los elementos del circuito.

Estas concepciones, reflejan la idea de los estudiantes acerca de la batería. Ellos la consideran como una fuente proveedora de electrones (Pozo, J. & Gómez Crespo, M, 2000). De acuerdo con el texto, "...a fin de que se produzca una corriente eléctrica, debe aplicarse un campo eléctrico para mover las partículas cargadas en una dirección determinada."¹⁸⁷ La necesidad de un campo eléctrico para que los electrones se muevan, aunado a que los electrones que se mueven son aquellos que se encuentran en los electrolitos, en el conductor metálico, etc., puede hacer ver a los estudiantes que los electrones no se encuentran almacenados en la batería.

La definición que los autores utilizan para la corriente, puede generar confusión entre los estudiantes. Esto se debe, a que los estudiantes consideran a la corriente como "algo" que se mueve a través de los cables, ya sean partículas o electrones. De esta forma, si se define a la corriente como un chorro de partículas, se da poco detalle acerca de la corriente, es decir, no se especifica si la corriente es ese chorro de partículas, su movimiento, o es el flujo de algo compuesto por un chorro de partículas.

¹⁸⁷ Alonso, M. & Finn, E., Física vol. II Ondas y Campos, p. 489.

5.2.9. Electricidad y Magnetismo, Riveros, H.

El **campo eléctrico** es presentado en el capítulo 2. El capítulo tiene una pequeña introducción acerca de la Ley de Coulomb y la fuerza de interacción a distancia entre dos cargas estáticas separadas. Como una modificación a la acción instantánea, el autor menciona:

"Sabemos que... la información del movimiento de una carga se propaga a la velocidad de la luz. Por ahora, consideremos que el movimiento de las partículas cargadas es sumamente lento en comparación con la velocidad de la luz. En lugar de la interacción a distancia, podemos suponer que la presencia de una carga modifica el espacio a su alrededor, estableciendo un campo eléctrico, y que el campo eléctrico ejerce una fuerza sobre la carga proporcional al valor de ésta." ¹⁸⁸

Con esta introducción, el autor deja clara su posición acerca del campo eléctrico, el cual corresponde a una **modificación del espacio** debido a la presencia de una carga eléctrica. Esto a diferencia de la definición brindada por los autores de los demás textos analizados.

Dé forma similar a como se hace en Física vol. 2 (Halliday, D., et. al.), para introducir el campo eléctrico, el autor plantea dos preguntas:

- a. ¿Cómo se describe la temperatura en las diferentes partes de un cuarto?
- b. ¿Cómo se describe la velocidad con la que fluye el agua de un río?

Al responder a la primera pregunta, define la palabra campo como "una región del espacio en la cual se observa una cierta propiedad o variable, descrita por una función de la posición y del tiempo." ¹⁸⁹

El formato empleado para la presentación del libro, no da espacio para explicar el porqué se menciona el campo de temperaturas y velocidades antes de introducir el campo eléctrico, y cómo se relacionan o no con el eléctrico.

La guía de preguntas que lleva a la definición del campo eléctrico, continúa así:

- c. ¿Cómo se describe la fuerza eléctrica sobre una partícula de carga q , colocada en diferentes puntos alrededor de una carga q , fija en el origen de coordenadas?
- d. Escriba la ley de Coulomb para dos cargas situadas en posiciones arbitrarias.

¹⁸⁸ Riveros, H., Electricidad y Magnetismo, p.39.

¹⁸⁹ Ibidem, p.39.

e. Defina el campo eléctrico producido por una carga Q.

Como mencioné en el párrafo anterior, el formato del libro no permite que se haga una relación entre las preguntas que llevan a la definición del campo eléctrico. El campo eléctrico es expuesto de la siguiente manera:

"Podemos considerar que la presencia de la carga Q establece un campo eléctrico en sus alrededores, y que la fuerza sobre otra carga q situada en el campo, es proporcional a la misma:

$$\vec{F} = q\vec{E} \quad \dots (9)$$

en donde \vec{F} es la fuerza sobre la carga q a causa del campo eléctrico producido por la carga Q.¹⁹⁰

El **campo magnético** es presentado en el capítulo 8 como una característica de los imanes:

"Decimos que se establece un campo magnético en sus alrededores, el cual representamos mediante las llamadas líneas de inducción o líneas de fuerza, que podemos visualizar mediante limaduras de hierro. Las limaduras actúan como pequeñas brújulas que se orientan una tras otra, bajo los efectos del campo magnético, dibujando líneas que parecen salir o llegar en puntos llamados polos."¹⁹¹

Para la descripción del campo magnético, el autor plantea una actividad para observar las líneas de fuerza que se encuentran lejos del imán, ya que con la limadura de hierro, sólo se podrán observar las que se encuentren cerca de él. Este apartado sólo ofrece al estudiante una visualización de las líneas de fuerza.

La **corriente eléctrica** se define mediante el siguiente párrafo:

"Se define como corriente I en un conductor a la cantidad de carga ΔQ que pasa en el tiempo Δt , a través de una sección recta del mismo."¹⁹²

La pregunta siguiente al párrafo anterior, va encaminada a la descripción de la corriente como un flujo de partículas de carga e, velocidad v, y densidad n.

Secciones adelante, el autor pide al alumno que describa el movimiento de iones en el agua y el de electrones en un metal, expresando así la existencia de varios tipos de corrientes eléctricas. La descripción que realiza, es similar a la de Purcell.

¹⁹⁰ Riveros, H., Electricidad y Magnetismo, p. 41.

¹⁹¹ Ibidem, p. 173.

¹⁹² Ibidem, p. 129.

Con respecto a la corriente de desplazamiento, sólo es sugerida como una modificación a la Ley de Ampère, por lo cual no se da una explicación física del fenómeno.

Los demás aspectos del análisis, quedan condensados en los siguientes puntos:

1. (historia) El autor no hace uso de antecedentes históricos para la presentación de los conceptos.

2. (analogías) Antes de plantear la pregunta que llevará a la descripción del campo eléctrico, el autor hace referencia al campo de temperatura de una habitación y al campo de velocidades de un río. Con estos ejemplos el autor pretende familiarizar al estudiante con los campos vectoriales y escalares, de tal forma que al introducir el campo eléctrico, el lector logre distinguir que se trata de un campo vectorial. Sin embargo, el formato de pregunta y respuesta, no permite retomar la información anterior, con el fin de establecer similitudes y diferencias entre estos modelos y el campo eléctrico; quedando como labor del lector, establecer la conexión entre las tres preguntas.

3. (simplificaciones) La forma de presentar los conceptos, como una respuesta corta y basada en una ecuación matemática, es una forma de simplificar los conceptos, al ser presentados de forma rápida.

4. (cuantitativo) El resumen de la presentación de los tres conceptos, nos muestra que estos son tratados de forma cuantitativa. Para cada pregunta - defina el campo eléctrico producido por una carga Q , defina la corriente en un conductor y ¿cuáles son las principales características de los imanes?-, el autor provee una respuesta breve y basada en una formulación matemática. En el caso del magnetismo, después de describir las propiedades de los imanes y las líneas de fuerza de una barra imantada, establece la ecuación de la fuerza de Lorentz.

Así, cada respuesta va acompañada de una ecuación matemática y un texto breve que describe cada uno de los términos que aparece en la ecuación.

5. (problemas) Los problemas no son una parte central del texto. Por ello, en el capítulo

de campo eléctrico se utilizan las ecuaciones planteadas por el autor a lo largo del capítulo para calcular la torca ejercida sobre un dipolo colocado en un campo uniforme, y el campo debido a un anillo con carga Q y un dipolo. Es importante resaltar que la resolución de los problemas sigue el mismo formato que las preguntas; es decir, se resuelven de forma rápida y sin explicar cada fenómeno; por lo que los conceptos que intervienen en cada uno no son discutidos. Lo mismo sucede en los problemas resueltos en los capítulos de corriente eléctrica y magnetismo.

6. (justificación) El autor no brinda a los estudiantes una justificación de los tres conceptos analizados. Esto se debe, en parte, al formato, ya que de cierta forma no permite apreciar la teoría como un conjunto de conocimientos que tienen alguna aplicación, o , en el caso de los conceptos analizados, que son la base de la teoría electromagnética.

7. (relación) Como un resultado directo del formato del texto, no se aprecia la articulación de los conceptos. Cada pregunta y respuesta parece un tema aislado, que, aunque forma parte de la teoría electromagnética, son partes aisladas de la teoría.

8. (experimentación) Las actividades experimentales sólo son utilizadas para mostrar conceptos relacionados con el magnetismo. La primera actividad consiste en dibujar las líneas de fuerza del campo magnético de un imán, siguiéndolas con una brújula¹⁹³. Con ello , el estudiante visualizará la forma de las líneas de fuerza de un imán.

La segunda actividad propuesta, consiste en describir lo que sucede cuando se acerca un imán de barra a la pantalla de un osciloscopio con su eje horizontal y paralelo a la pantalla. Mediante esta experiencia, el autor "obtiene" la fuerza de Lorentz.

En términos generales, el formato del texto, no ayuda mucho a que los estudiantes relacionen los fenómenos que se van presentando, además de que no hay un equilibrio entre la formulación matemática de las teorías y la explicación de los conceptos.

¹⁹³ La mecánica de la actividad está descrita de forma amplia en el texto. Rivero, H., Electricidad y Magnetismo, p. 174.

Por último, veremos qué influencia tiene el texto en las ideas previas de los estudiantes.

9. (ideas previas) De acuerdo con Pocovi (2002) en algunos casos, en especial en el caso de las líneas de fuerza, los textos no pueden ayudar a modificar las concepciones de los estudiantes debido a que las explicaciones sobre los conceptos son breves. Este es el caso de Electricidad y Magnetismo (Riveros, H.); en donde el autor no brinda una explicación amplia de los conceptos, aunado a que no hace explícita la relación que hay entre ellos. No se puede establecer, qué concepciones ayuda a formar, o a modificar, debido a la brevedad con la que se presenta la información.

5.2.10. Fundamentos de la teoría electromagnética, Reitz, J., Milford, F. & Christy, R.

El **campo eléctrico** es presentado en el capítulo de electrostática a continuación de la Ley de Coulomb, de la siguiente forma:

“El campo eléctrico en un punto se define operacionalmente como el límite de la fuerza sobre una carga de prueba colocada en el punto con respecto a la carga de prueba, tomándose el límite a medida que la magnitud de la carga de prueba tiende a cero. El símbolo que se acostumbra emplear para el campo eléctrico es E .

En notación vectorial, la definición de E se convierte en:

$$\vec{E} = \lim_{q_0 \rightarrow 0} \frac{\vec{F}_q}{q} \quad \text{... (10)}$$

La introducción del campo eléctrico que se realiza a través de la presencia de una carga de prueba en un campo eléctrico, es similar a la que se hace en Física vol. 2 (Halliday, D., et. Al.) y Electricity & Magnetism (Purcell, M.).

Lo anterior, nos lleva a las observaciones que hacen los autores mencionados acerca del límite. Algunas de estas observaciones son: que el proceso de límite es necesario para que la carga de prueba no afecte la distribución de carga original responsable del campo eléctrico E y que cuando alguna de las cargas del arreglo original se puede tomar como la

¹⁹⁴ Reitz, J., Milford, F. & Christy, R., Fundamentos de la teoría electromagnética, p. 31.

de prueba, no es necesario tomar el límite.

Siguiendo lo anterior, los autores proceden a establecer una ecuación para el campo eléctrico, la cual, es más compleja a diferencia de las presentadas por los textos anteriores.

Algunas de las características del campo eléctrico establecidas son:

- a. El campo puede calcularse en cada punto del espacio en la vecindad de un sistema de cargas.
- b. Es una función vectorial puntual, o un campo vectorial.

Estas propiedades son similares a las que presentan otros autores, constituyendo sólo una descripción del campo.

Las **líneas de fuerza** fueron introducidas por **Michael Faraday**, hecho que sólo sirve de referencia, un "dato histórico", para ser enseguida definidas como un elemento que ayuda a visualizar el campo eléctrico, describiendo a cada una como "una línea imaginaria (o curva) dibujada de tal manera que su dirección (o tangente) en cualquier punto es la dirección del campo eléctrico en dicho punto."¹⁹⁵

El **campo magnético** es presentado en el capítulo 8, en cuya introducción se realiza una breve reseña de los acontecimientos históricos que llevaron al desarrollo de la teoría magnética, iniciando con los efectos magnéticos conocidos desde épocas antiguas, terminando con el trabajo teórico de Maxwell, quien estableciera la conexión entre los campos eléctricos y magnéticos por medio de sus ecuaciones. Dentro de esta reseña, se hace énfasis en que el estudio del campo magnético no se inició con el objetivo de investigar el campo en sí, sino sus efectos (atracciones y repulsiones), hasta que después se le descubrió como socio inseparable del campo eléctrico.

El estudio del campo magnético comienza con el fenómeno de inducción electromagnética. Para ello, se hace referencia a la forma en que se definió la fuerza ejercida sobre una carga puntual, debido a otra colocada en otro lugar, ambas en reposo

¹⁹⁵ Reitz, J., Milford, F. & Christy, R., Fundamentos de la teoría electromagnética, p. 33.

(Ley de Coulomb), indicando que si las cargas se movieran con velocidad constante, la fuerza entre ambas no sería la misma, sino que aparecerían fuerzas magnéticas. Con esto, se introduce el término de **fuerza magnética**.

Siguiendo esta analogía con el campo eléctrico, los autores se valen de una carga de prueba para definir el campo magnético, con la observación de que en la definición del campo, no sólo debe aparecer la carga de prueba, sino también su velocidad:

$$\overline{F}_m = q\overline{v} \times \overline{B} \quad \dots(11)$$

La carga de prueba ha de considerarse al igual que se hizo para el campo eléctrico en un límite donde tiende a cero, de tal forma que no afecte la fuente del campo **B**. Por último, se hace la consideración de que si se encuentran presentes campos eléctricos y magnéticos, entonces deben sumarse las fuerzas eléctricas y magnéticas que actúan sobre una carga móvil; dando con ello la fuerza de Lorentz.

Queda establecido por los autores, que la fuerza magnética entre dos cargas es más compleja que la fuerza eléctrica, debido a la dependencia con la velocidad y a los productos cruz.

La **corriente eléctrica** se trata en el capítulo 7, justo antes del capítulo de campo magnético. Es una forma de introducir cargas con movimiento uniforme; lo cual implica de acuerdo con los autores, el estudio de conductores de electricidad, ya que son materiales en los que los portadores de carga son libres de moverse bajo campos eléctricos estacionarios.

La definición de la **corriente eléctrica**, queda expresada de la siguiente manera:

" La carga en movimiento constituye una *corriente* y el proceso por el cual la carga se transporta se llama *conducción*. Para ser precisos, la corriente *I* se define como la velocidad a la que se transporta la carga a través de una superficie dada en un sistema conductor... De este modo,

$$I = \frac{dQ}{dt} \quad \dots(12)$$

¹⁹⁶ Reitz, J., Milford, F. & Chirsty, R., Fundamentos de la teoría electromagnética, p. 162.

De la definición anterior, se puede observar el uso de la palabra "transportar". El que la definición quede en términos de una velocidad a la que se transporta corriente, puede hacer pensar a los estudiantes que algo dentro del conductor está transportando a la corriente.

En un apartado posterior titulado "*Naturaleza de la corriente*", se brinda una visión un tanto microscópica del fenómeno, aunque páginas adelante, se habla sobre la "*Teoría microscópica de la conducción*". Las características de la corriente eléctrica citadas en forma textual del apartado "*Naturaleza de la corriente*", son:

1. *En un metal la corriente es transportada por los electrones únicamente.*
2. *Sólo los electrones de valencia (los más exteriores) tienen libertad para participar en procesos de conducción. Los otros electrones se encuentran ligados a los iones.*
3. *En condiciones estacionarias los electrones pueden introducirse en el metal por un punto y extraerse por otro, produciéndose una corriente, pero el metal como todo es electrostáticamente neutro.*
4. *Fuerzas electrostáticas intensas impiden que un exceso de electrones se acumule en cualquier punto del metal. De forma semejante, una deficiencia de electrones es corregido por fuerzas electrostáticas de signo contrario.*
5. *En un electrolito la corriente es conducida tanto por iones positivos como por iones negativos, aunque debido a que algunos iones se mueven más rápidamente que otros, la conducción por un tipo de ion predomina generalmente.*
6. *Es importante hacer notar que iones positivos y negativos que viajan en sentidos opuestos contribuyen a producir la corriente en el mismo sentido.*
7. *En general, una corriente eléctrica se origina como respuesta a un campo eléctrico.*
8. *Cada grupo de portadores de carga tiene un movimiento común llamado movimiento de deriva del grupo.*
9. *Cada partícula del grupo tiene un movimiento térmico, así como uno de deriva.*
10. *El movimiento térmico sí es aleatorio, mientras que el de deriva no. Por consiguiente, al considerar estos procesos de conducción es admisible olvidar el movimiento aleatorio que no contribuye a la corriente total, y utilizar*

*representaciones sencillas.*¹⁹⁷

Los autores hacen un énfasis especial en que lo que hasta ahora han definido, son corrientes de conducción, aunque existen otros tipos, como la de convección que es el resultado de un transporte masivo de un medio cargado.

De las características citadas, hay que resaltar:

- a. Los enunciados 1 y 5, mencionan que la corriente es transportada ya sea por electrones para el primer caso o por iones en el segundo caso. Esta oración refuerza la forma en la que se había definido la corriente eléctrica al principio del capítulo. Tanto la definición como los enunciados 1 y 5, dan a entender que la corriente es "algo" que necesita ser transportado, de tal forma que el papel tanto de los electrones como de los iones es transportar la corriente.
- b. El enunciado 3 es confuso, debido a que habla de electrones que entran por un lado del cable y salen por el otro extremo. Puede dar la imagen al estudiante de que para crear una corriente fuera necesario introducir electrones al metal y sacarlos después para eliminar la corriente.
- c. Los últimos tres enunciados (8, 9 y 10), explican que las partículas cargadas tienen varios tipos de movimientos, unos aleatorios y otros no.

Por lo que respecta a los apartados siguientes, la corriente se liga primeramente a los circuitos eléctricos, introduciendo la Ley de Ohm y las Leyes de Kirchoff, cerrando el capítulo con la "*Teoría microscópica de la conducción*".

La "*Teoría microscópica de la conducción*", realiza una formulación matemática del comportamiento de una partícula cargada en un medio. Para ello, refuerza algunas de las ideas que fueron citadas en el apartado de la "*Naturaleza de la corriente*". Algunas de ellas, son:

1. El electrón se acelera por un período corto, después del cual sufre una colisión con uno de los átomos del material.

¹⁹⁷ Reitz, J., Milford, F. & Chirsty, R., Fundamentos de la teoría electromagnética, p. 163-164.

2. Se aclara que la velocidad térmica es mayor que la velocidad de deriva.
3. En los metales existe un tiempo de relajación para el decaimiento de la corriente, el cual es de igual magnitud que el tiempo medio entre colisiones, aunque ambos son conceptualmente distintos.

Con estas ideas, los autores amplían el tema de la corriente eléctrica, y con ello el conocimiento que queda a disposición de los estudiantes.

En Fundamentos de la teoría electromagnética (Reitz, J., et. al.), los autores no explican el origen de la **corriente de desplazamiento**; solamente mencionan que el desarrollo matemático realizado para obtener el término que describe la corriente de desplazamiento, es similar al que realizara Maxwell.

Los demás aspectos del análisis, quedan expresados en los siguientes puntos:

1. (historia) La historia es utilizada en dos ocasiones dentro de la porción de texto analizada. En primer lugar, cuando se presentan las líneas de fuerza, se menciona que estas fueron introducidas por Michael Faraday. Sin embargo, no hay una referencia que indique la forma en la que el científico las consideraba.

En segundo lugar, en la introducción del campo magnético, son mencionados algunos de los descubrimientos que llevaron al establecimiento del concepto de campo magnético. Se narra el conocimiento que se tenía sobre los efectos de la magnetita desde tiempos lejanos, el descubrimiento de Oersted y el trabajo teórico de Maxwell. Para ello, se hace énfasis en la relación que se encontró entre el campo eléctrico y el magnético a partir del trabajo de Oersted, y la demostración de que esta asociación era real y que los campos eléctricos y magnéticos están "inextricablemente entrelazados".¹⁹⁸

Como se puede observar esta reseña, sirve como un dato histórico, ya que no se menciona de qué sirvieron todos estos experimentos y diseños de teorías, más que para ver que ambos campos están ligados.

¹⁹⁸ Reitz, J., Milford, F. & Chirsty, R., Fundamentos de la teoría electromagnética, p.190.

2. (analogías) Los conceptos no son explicados a través de analogías.

3. (simplificaciones) La exposición de los temas de campo eléctrico y magnético son simplificados por los autores, en el sentido en que la exposición es principalmente matemática. Las definiciones brindadas son de tipo operacional, por lo que se hacen pocas indicaciones acerca de las condiciones bajo las cuales se define el campo y son válidas las ecuaciones propuestas.

En la exposición de la corriente eléctrica, los autores utilizan gráficos que ilustran una corriente producida por el movimiento tanto de portadores positivos como negativos; la cual de acuerdo con el autor, está simplificada en sobremanera.

4. (cuantitativo) En la forma en la que los autores presentan el tema, y que ha sido resumida al principio de este apartado, se puede observar que el trato es meramente cuantitativo. Los conceptos no son discutidos, sólo se establecen las ecuaciones que ayudarán a calcular tanto el campo eléctrico como el magnético en un punto.

En contraste, los autores dedican dos apartados para explicar el fenómeno de corriente eléctrica, estableciendo pocas fórmulas y dedicando más tiempo al modelo de conducción.

5. (problemas) Una vez que se ha expuesto el concepto de campo eléctrico, los autores pasan directamente a la exposición del potencial electrostático, la Ley de Gauss y el dipolo eléctrico. No hay problemas resueltos que demuestren la aplicación de las ecuaciones propuestas en cada tema. Los enunciados de los problemas se encuentran en un apartado especial al final del capítulo.

En el tema de campo magnético, no hay problemas resueltos. Los que se presentan constituyen una aplicación de la Ley de Biot y Savart y la Ley Circuital de Ampère. Por lo tanto, el tema de campo y las ecuaciones propuestas en él, sólo sirven como un antecedente para los demás fenómenos electromagnéticos.

6. (justificación) Los autores no brindan justificación alguna a la aparición de los

conceptos dentro del texto. Esto se ve reflejado en la introducción del capítulo titulado *El campo magnético de corrientes estacionarias*: "El segundo tipo de campo que interviene en el estudio de la electricidad y del magnetismo es el campo magnético."¹⁹⁹ Así, tanto el campo eléctrico como el magnético son presentados como una parte constitutiva de la teoría electromagnética.

7. (relación) En el caso de la corriente eléctrica y el campo eléctrico, se hace explícita la necesidad de un campo eléctrico constante para el movimiento de las cargas en un conductor. En el caso del campo magnético y la corriente eléctrica, aunque se hace referencia al descubrimiento de Oersted, sólo se menciona como un mero dato histórico y no se profundiza en esta relación. Por último, se hace énfasis en la liga existente entre ambos campos, y que el trabajo de Maxwell, sentó las bases para hacer evidente dicha relación. Esta liga queda expresada a través de ecuaciones.

8. (experimentación) Es de notarse, que, ni la inducción magnética, ni los demás fenómenos son explicados. Esto es, sólo se mencionan y se obtienen las ecuaciones que los describen, pero no se brinda una explicación detallada de cada experimento.

Lo mismo sucede con el tema de campo y corriente eléctrica. En el primero, se utilizan experiencias pensadas para introducir el concepto, y en el segundo caso, no se vale de ninguna experiencia para ejemplificar el fenómeno de conducción.

A lo largo de estos ocho puntos, hemos observado que el tratamiento que los autores hacen de los conceptos, es meramente cuantitativo. Los conceptos no son discutidos o expuestos de forma amplia. Hay que recordar que en el prefacio, los autores mencionan la importancia de los problemas dentro del texto, ya que, su preocupación es disminuir la brecha entre el tratamiento formal y los problemas enunciados.

Por último, veremos la influencia que tiene el texto en las ideas previas de los estudiantes.

9. (ideas previas) En esta ocasión, al igual que sucedió con el texto de Alonso y Finn, el

¹⁹⁹ Reitz, J., Milford, F. & Chirsty, R., Fundamentos de la teoría electromagnética, p.190.

texto no puede ayudar a modificar los marcos bajo los cuales, los estudiantes analizan los campos eléctricos y magnéticos:

a. *El campo eléctrico es una esfera de influencia en la que cualquier carga sentirá una fuerza.* El tratamiento que hacen Reitz y Milford del campo eléctrico, es a través de la fuerza que siente una carga de prueba que es colocada cerca de un arreglo de cargas estáticas. De esta forma, el campo se define como el límite de esta fuerza cuando la carga tiende a cero. Los autores no ofrecen un panorama distinto a este, es decir, otras situaciones bajo las cuales se puede considerar la presencia de un campo eléctrico, es decir, si estos sólo se dan en situaciones estáticas, o si sólo se mide de esta forma, con la fuerza que siente una carga.

b. *Siempre que hay cargas presentes, hay un campo eléctrico o magnético.* Este marco, se relaciona con la situación anterior, ya que al introducir el campo de forma en que lo hacen, siempre se relacionará la existencia del campo con la presencia de cargas estáticas puntuales. Hay que resaltar que, las concepciones e ideas previas incluidas en este marco, expresan situaciones en las que se encuentran presentes arreglos de cargas puntuales estáticas, como aquella utilizada por Reitz y Milford para introducir el concepto de campo.

c. *El campo eléctrico necesita un medio de transmisión.* Dentro de este marco, se encuentran las concepciones de los estudiantes que brindan a las líneas de fuerza el papel de transmisoras de las acciones eléctricas. El trato que hacen los autores sobre las líneas de fuerza, no puede ayudar a los estudiantes a modificar estas concepciones. Esto se debe a que, aunque los autores mencionan que las líneas fueron introducidas por Faraday, no se detienen a explicar cuales fueron los factores que ayudaron a que la forma en que Faraday concebía las líneas, cambiara. Otro elemento que no permite el cambio en la concepción de los estudiantes, es que la exposición de las líneas de fuerza es breve, y no contiene los elementos principales que describen las líneas de fuerza, así como el objetivo que se persigue con el uso de ellas.

En cuanto a las ideas previas de corriente eléctrica (sección 5.3.1.), el texto no puede

ayudar a modificar las siguientes:

b12 La corriente como un autobús que recoge gente en la estación (batería) y los baja en la parada (foco), después regresa a la estación.

Esta concepción hace referencia principalmente a que la corriente es gastada por los elementos del circuito. En el resumen de la presentación del concepto de corriente, se hizo énfasis en que se hablaba de la corriente como algo que necesitaba ser transportado. La concepción 12, también expresa la necesidad de que algo transporte la corriente en el circuito, por lo tanto, el texto no puede ayudar a modificar esta concepción.

b10 La corriente eléctrica a través de un metal es producida por el abastecimiento de electrones, entonces los electrones se mueven libremente porque hay muy pocos. Después adquieren alta velocidad, lo que produce el flujo de electrones.

Esta concepción contiene dos elementos que hay que tomar en cuenta. En primer lugar, implica que la corriente es un flujo de electrones, y, en segundo lugar, que la batería abastece los electrones para la corriente.

Dentro de la descripción que hacen los autores de la corriente, establecen que "en condiciones estacionarias los electrones pueden introducirse en el metal por un punto y extraerse por otro, produciéndose una corriente, pero el metal como todo es electrostáticamente neutro."²⁰⁰

Este enunciado es confuso, ya que no se explica a lo que se refiere con la introducción de cargas en el conductor. Además de esto, se puede observar que la expresión es similar a la concepción b12, la cual establece la necesidad de un abastecimiento de electrones para producir la corriente eléctrica.

Como se puede observar, las concepciones anteriores, hacen referencia a un elemento de los circuitos que es la batería. Ya que el texto, no dedica tiempo de exposición al papel de la batería en el circuito, no puede ayudar a modificar estas concepciones.

²⁰⁰ Reitz, J., Milford, F., & Christy, R., Fundamentos de la teoría electromagnética, p. 163.

Otro aspecto importante, es que el fenómeno de conducción es tratado de forma microscópica principalmente, sin hacer una relación entre lo que se observa, es decir, las mediciones que se obtienen con un multímetro y la forma en que se comporta el circuito como un sistema macroscópico y lo que sucede microscópicamente. De acuerdo con Eylon y Ganiel (1990), ambos aspectos son necesarios para el buen entendimiento de los circuitos eléctricos, y por lo tanto de los distintos fenómenos que se ven involucrados, como el de corriente eléctrica.

5.2.11. Classical Electromagnetic Theory, Vanderlinde, J.

El **campo eléctrico** y el **magnético** son introducidos a la par en el primer capítulo, empezando con una breve introducción histórica sobre el descubrimiento de la electricidad con los griegos, DuFay en el siglo XVIII y Benjamín Franklin quien explicaba la electricidad en términos de un exceso o deficiencia del fluido eléctrico. La Ley de Coulomb precede como en todos los textos a la introducción del **campo eléctrico**:

"Aunque la Ley de Coulomb hace un trabajo adecuado en predecir la fuerza que una partícula causa a otra,... Sería más satisfactorio si la partícula cargada sintiera una fuerza debido a una influencia local, un campo, creado por otras partículas cargadas... La fuerza sobre una partícula debe ser proporcional a su carga; todas las demás propiedades de la fuerza serán asignadas al campo eléctrico $\mathbf{E}(\mathbf{r})$. Entonces definimos el campo eléctrico por:

$$\bar{F} = q\bar{E}(\mathbf{r}) \quad \text{" 201} \quad \dots(13)$$

Dada esta definición, el autor considera importante resaltar el hecho de que una partícula no puede ejercer fuerza sobre ella, por lo que no le afecta el campo establecido por ella misma.

En el mismo capítulo, páginas más adelante, se introducen las **fuerzas magnéticas** como un resultado del objetivo del autor, de presentar la electricidad y el magnetismo paralelamente.

²⁰¹ Vanderlinde, J., Classical Electromagnetic Theory, p. 4.

Las fuerzas magnéticas son utilizadas por el autor para demostrar la conexión íntima entre la electricidad y el magnetismo:

"Cuando las cargas están en movimiento, una fuerza adicional aparece. Podríamos simplemente postular una ley de fuerza,... pero sería más satisfactorio demostrar la conexión íntima entre la electricidad y el magnetismo, mediante la obtención del magnetismo como una consecuencia de la electricidad y la covariancia relativista."²⁰²

El campo magnético es introducido como una consecuencia relativista, al igual que lo hace el autor de Fundamentos de la Teoría Electromagnética (Reitz, F., et. Al.). Mediante un desarrollo matemático cuyo resultado es la expresión para la fuerza de Lorentz, se introduce el campo magnético, el cual es un campo vectorial.

Con respecto a la **corriente eléctrica**, el texto no dedica ningún espacio para explicar el fenómeno. La corriente de desplazamiento queda expresada de forma matemática en el tercer capítulo, al igual que en los textos anteriores como un elemento faltante en las ecuaciones de Maxwell.

El análisis del texto queda condensado en los siguientes puntos:

1. (historia) El primer apartado del capítulo que trata sobre los campos eléctrico y magnético en el vacío, está dedicado a narrar algunos de los sucesos que precedieron al establecimiento de la Ley de Coulomb. El autor comienza con la distinción de los dos tipos de electricidad por parte de Dufay, y continúa con la explicación que diera Franklin de la electricidad: exceso o deficiencia del fluido vítreo eléctrico. Termina con el trabajo de Coulomb, quien midiera la fuerza atractiva y repulsiva entre cargas con una balanza de torsión.

Como se puede observar, los hechos históricos a los que se hace referencia, son mostrados como descubrimientos, es decir, como actividades individuales. No se menciona el trabajo que llevó a los científicos el establecer cada una de las teorías, ni las aportaciones de otros investigadores, o cómo es que se dio el cambio de la concepción de la electricidad como un fluido, a la que se tiene ahora.

²⁰² Vanderlinde, J., Classical Electromagnetic Theory, p. 13.

La historia es utilizada por algunos textos como una forma de humanizar la ciencia, pero, en este caso, puede ayudar a los estudiantes a ver que "los conocimientos científicos no son verdades eternas, sino construcciones realizadas en un contexto social definido...., mostrar que los conocimientos científicos no son resultados de una simple acumulación de observaciones..."²⁰³, aunque, lo más importante y lo que se considera en esta tesis, es "mostrar en detalle algunos de los momentos de transformación profunda de una ciencia e indicar cuáles fueron las resistencias a la transformación... Ese análisis puede dar las herramientas conceptuales para que los alumnos comprendan la situación actual de la ciencia, su ideología dominante.." ²⁰⁴

Así, la historia juega un papel importante, ya que puede dar al estudiante una visión de la transformación de los conceptos de campo y corriente, y ayudarlo a ver cuales fueron los elementos que llevaron a dicha transformación.

2. (analogías) El autor no utiliza analogías para introducir los conceptos.

3. (simplificaciones) La presentación de los conceptos de campo magnético y eléctrico se realizan de manera simplificada. Esto se debe a que el autor establece las ecuaciones que describen ambos conceptos, sin profundizar en su significado o la descripción de los fenómenos.

4. (cuantitativo) De acuerdo con el punto anterior, el trato del tema resulta ser meramente cuantitativo. No se dedica tiempo de exposición a los conceptos, antes bien, después de establecer la ecuación para cada uno, se pasa directamente a los problemas.

5. (problemas) Los problemas constituyen una parte fundamental del texto. Hay que recordar que los primeros cuatro capítulos del texto –entre los que se encuentra el de campos eléctrico y magnético- son presentados a manera de repaso, y además se propone que todos los conceptos presentados sean utilizados en ejemplos y problemas. Después de la sección que trata el campo eléctrico, el problema de aplicación tiene como

²⁰³ Gagliardi, R. & Giordan, A., La historia de las ciencias: una herramienta para la enseñanza, p.254.

²⁰⁴ Idem.

objetivo encontrar el campo eléctrico al centro de un plato circular, y para el campo magnético, el primer problema resuelto corresponde a una aplicación de la Ley de Biot y Savart.

6. (justificación) En el texto, no se ve reflejada la importancia de los conceptos de campo eléctrico y magnético.

7. (relación) Uno de los objetivos del autor, es presentar de forma paralela los conceptos de campo eléctrico y magnético, para apreciar su relación. Sin embargo, cuando se introduce el campo magnético, y las leyes concernientes al tema, el autor no hace ninguna referencia al campo eléctrico ni a su relación con el campo magnético.

8. (experimentación) El texto no presenta experimentos que apoyen la exposición de los conceptos.

9. (ideas previas) La brevedad en la exposición de los campos eléctrico y magnético, así como de la corriente eléctrica, no ayuda a modificar las concepciones erróneas de los estudiantes con respecto a estos temas.

5.4. Las ideas previas, los textos y la historia

En el análisis de los textos, hemos visto cómo, los gráficos, la omisión de información, las definiciones que se dan de los tres conceptos, los problemas, etc. refuerzan las ideas previas de los estudiantes, y en pocos casos ayudan a modificarlas. Ciertamente, los casos en los que las ideas previas se pueden ver modificadas mediante el estudio de los textos analizados, son pocos. También se ha observado que muchas veces estos no proveen los elementos suficientes y necesarios para que el alumno tenga una buena comprensión de los conceptos; siendo esta una razón por la que se dificulte el aprendizaje. Esto ha sido reportado anteriormente por algunos investigadores (Dall'Alba, G., Walhs, E., Bowden, J., Martín, E., Masters, G., Ramsden, P. & Stephanou, A., 1993).

Uno de los puntos analizados, fue la forma en que los textos utilizaban la historia, si es que echaban mano de ella para exponer el desarrollo de alguno de los conceptos.

Así, tenemos que sólo la mitad de los diez textos, utiliza la historia en algún momento de la exposición. Los momentos históricos que presentan o a los que sólo hacen referencia, así como las diversas concepciones de los científicos que son reportadas, se presentan de forma resumida, en la siguiente tabla:

Tabla 3. Uso de la historia en los diez libros de texto analizados

Texto	Contenido histórico	Concepciones de los científicos referidas en el texto
Arons (II)	<ul style="list-style-type: none"> -Descubrimientos de Volta y Galvani. Descripción un tanto detallada de las pilas de Volta. -Descubrimiento de Oersted. -Atracción y repulsión de dos cables por los que circula corriente –Ampère-. -Trabajo de Faraday sobre las líneas de campo y el establecimiento del éter. -La elaboración matemática por parte de Maxwell de la teoría de campo electromagnético. -Analogías desarrolladas por Thomson entre el flujo de un fluido y el de la electricidad. 	<ul style="list-style-type: none"> -Volta consideraba a la corriente eléctrica como un fluido. -Faraday veía a las líneas de fuerza como las transmisoras de las acciones eléctricas y magnéticas.
Rogers (I)	No hace referencia a la historia.	
Olenick, Apostol & Goodstein (II)	<ul style="list-style-type: none"> -Designación de un nombre para los materiales conductores y no conductores. -La creación de las líneas de fuerza por parte de Faraday para explicar las acciones eléctricas. 	<ul style="list-style-type: none"> -Gilbert consideraba que la electricidad era una virtud- -Dufay consideraba a la electricidad como un fluido. -Faraday decía que el campo magnético era una colección de líneas de fuerza.
Lorrain & Corson (I)	No hace referencia a la historia.	
Purcell (II)	<ul style="list-style-type: none"> -Descubrimiento de Oersted. -Matematización de la teoría electromagnética por parte de Maxwell. -Einstein desarrolla la teoría de la relatividad. 	<ul style="list-style-type: none"> -Faraday y Maxwell consideraban al campo como una entidad real físicamente hablando.

Halliday, Resnick & Krane (I)	No hace referencia a la historia.	
Alonso & Finn (I)	No hace referencia a la historia.	
Riveros (I)	No hace referencia a la historia.	
Reitz, Milford & Christy (II)	-Faraday introduce las líneas de fuerza. -Descubrimiento de Oersted.	
Vanderlinde (III)	-Distinción entre electricidad vítrea y resinosa -Dufay-. -Medición de la fuerza atractiva y repulsiva entre cargas -Coulomb-.	-Franklin veía a la electricidad como un exceso o deficiencia del fluido vítreo resinoso.

De la tabla anterior, se pueden identificar tres grupos. El grupo al que cada texto pertenece se indica con un número romano a continuación del nombre de los autores. El primero **(I)** de ellos corresponde a los textos que no utilizan la historia en su exposición, el segundo grupo **(II)**, a aquellos que sí lo hacen, tratando que sea una parte importante del capítulo, y que además brinde al estudiante una visión de cómo se desarrolló la teoría electromagnética, y pueda comprender mejor los conceptos; y por último, en el tercer grupo **(III)** podemos encontrar a los textos que utilizan la historia como una mera colección de nombres, fechas y descubrimientos, y por tanto no le dan la importancia que merece.

La tabla anterior, también nos da una idea de los momentos históricos que se dejan fuera de la exposición, así como si dan cuenta o no de la forma en que evolucionó la teoría electromagnética, y como consecuencia, la posición de el(los) autor(es) con respecto a los tres conceptos. Así, podemos resaltar los siguientes puntos:

1. Los textos que conforman el segundo y tercer grupo, no mencionan cómo se dio el proceso de transformación de los conceptos de campo electromagnético y corriente eléctrica. Esto es, a pesar de que algunos de ellos como los del segundo grupo presentan varios científicos y sus investigaciones, así como los conceptos

que sostuvieron algunos de ellos, no logran dar cuenta de las investigaciones, experimentaciones y descubrimientos que llevaron a la concepción actual del campo eléctrico y corriente eléctrica.

2. Los libros del segundo y tercer grupo abarcan épocas distintas, esto es, dependiendo de lo que quieran mostrar al lector o del enfoque del texto, detallan el trabajo de sólo algunos científicos. Un ejemplo de esto, es lo que hace Purcell al enfocarse en el desarrollo de la teoría de la relatividad por parte de Einstein, con el fin de enfatizar la relación entre los fenómenos eléctricos y magnéticos.
3. La historia y el conjunto de ecuaciones que conforman la teoría electromagnética, son presentadas como temas sin relación, como si la historia que narra el trabajo de los científicos como Faraday y Maxwell, fuera ajena a los resultados obtenidos –conceptos, ecuaciones y experimentos-. El texto *Evolución de los conceptos de la Física*, Arons, A. es un claro ejemplo de ello, ya que en un capítulo extenso y hasta cierto punto detallado, describe algunos de los acontecimientos que tuvieron lugar durante la evolución de la teoría electromagnética; pero, en el siguiente capítulo, expone las ecuaciones de campo y ejercicios enfocados a calcular la magnitud del campo, sin hacer referencia alguna a la historia, al capítulo anterior.
4. Es importante resaltar que ninguno de los textos del segundo y tercer grupo, dan un esquema completo del desarrollo de la teoría electromagnética. Esto es, como se indicó en el punto dos, mencionan el trabajo de algunos científicos y no hacen referencia a que ellos no fueron los únicos que colaboraron en la formación de la teoría, antes bien, adoptan la concepción de Faraday o Maxwell para describir el campo y los fenómenos relacionados con él.
5. Arons y Olenick realizan un énfasis especial en el trabajo y concepción de Faraday acerca de la transmisión de las acciones eléctricas y magnéticas por medio de las líneas de fuerza, sin discutir lo que esto significa y el porqué de que las líneas de fuerzas fueron eliminadas como un medio de transmisión del campo. Con ello, dan la impresión de que la concepción de Faraday es la que se utiliza hoy en día.
6. Así como Olenick y Arons, adoptan la posición de Faraday sobre el campo, todos los textos analizados –excepto Vanderlinde-, enseñan la corriente eléctrica como un fluido; a pesar de que, algunos de ellos tratan algunos aspectos de la teoría de electrones.
7. Es de notarse que, conforme el nivel de los textos va aumentando –esto es, el

grado de escolaridad al que van dirigidos-, es menor la atención que ponen en los conceptos y más la que dedican a la formulación matemática. Esto no debería ser así, ya que conforme el nivel de escolaridad aumenta, la capacidad de abstracción de los estudiantes aumenta, por lo que pueden reflexionar más en conceptos como el campo eléctrico y magnético, y relacionarlo con las ecuaciones, encontrándoles así, un significado.

De aquí que el uso de la historia en los textos, no ofrezca un panorama completo de la evolución de los conceptos de campo eléctrico, campo magnético corriente eléctrica, y por lo tanto, no sean suficientes los elementos que brinde para que los estudiantes mediten acerca de los factores que influyeron en el cambio de las primeras concepciones sobre campo y corriente –Gilbert, s. XVI-, hasta las concepciones modernas –Lorentz, Einstein, s. XX-. Esto es de suma importancia, ya que de acuerdo con Gagliardi y Giordan (1986), la historia de las ciencias puede definir cuáles fueron los conceptos estructurantes presentes en los momentos de profunda transformación de una ciencia, en este caso, de la física, en especial de los conceptos analizados.

Ahora bien, existen factores similares entre la forma en que los textos exponen los tres conceptos y la historia. Algunos de ellos son:

1. El estudio de la electrostática ocurrió primero que el de los circuitos eléctricos, tal y como se presenta en los textos analizados. (Benseghir, & Closset, 1996).
2. Algunos de los científicos utilizaron estructuras sencillas o analogías para aproximarse a los fenómenos electromagnéticos. Estos modelos y analogías tenían unos límites bien establecidos, en el sentido que los científicos estaban concientes de que lo que usaban eran analogías, y que sólo servían en algunas ocasiones. Tanto los textos como los estudiantes se valen de las analogías para explicar, en el caso de los libros, o explicarse a sí mismos, en el caso de los estudiantes, algunos fenómenos, en especial el de la corriente eléctrica.
3. La experimentación fue crucial para el desarrollo de la teoría electromagnética, siendo que, sobre todo los primeros científicos -Faraday, Ampère- basaron sus investigaciones y desarrollaron sus concepciones con base en las observaciones que realizaron. Sin embargo, en los libros analizados no se explota este recurso para ayudar a los estudiantes a visualizar algunos fenómenos, o para ayudar a la

formación de sus concepciones.

4. Algunas de las concepciones de los estudiantes sobre los fenómenos electromagnéticos, son similares a algunas de las expresadas por los científicos, durante los siglos XVII – XIX.

Por último, es necesario hacer un recuento de los problemas conceptuales que son apoyados o reforzados por los textos analizados. La siguiente tabla presenta de forma resumida cuáles son estos.

Tabla 4. Problemas conceptuales que pueden ser apoyados o reforzados por los libros de texto.

Texto	Problemas conceptuales que sí ayuda	Problemas conceptuales que son reforzados
Arons	<ul style="list-style-type: none"> -Falta de distinción entre fenómenos estáticos y dinámicos. -Relación directa entre la existencia de campo y la presencia de cargas. 	<ul style="list-style-type: none"> -Relación entre la existencia de campos y fuerzas sobre partículas cargadas. -Las líneas de fuerza como transmisoras de las acciones eléctricas y magnéticas. -Dos marcos bajo los cuales los estudiantes analizan el comportamiento de la corriente eléctrica en los circuitos. (M1b, M2b)
Rogers	<ul style="list-style-type: none"> -Marco que explica el modelo de gasto de la corriente eléctrica. M2b -La corriente sale por los dos polos de la batería. -Campo eléctrico sólo si hay cargas presentes. -Campo eléctrico sólo si hay fuerzas. 	<ul style="list-style-type: none"> -La corriente eléctrica como un flujo de electrones. -La corriente está almacenada en la batería. -Las líneas de fuerza como transmisoras de las acciones eléctricas y magnéticas.
Olenick, Apostol & Goodstein	<ul style="list-style-type: none"> -La corriente sale de la batería por los dos polos hacia los elementos del circuito. -Ayuda a ver al campo eléctrico como un elemento fundamental en la descripción de los fenómenos eléctricos. 	<ul style="list-style-type: none"> -La corriente como un flujo de electrones. -Transformación y gasto de la corriente por los elementos del circuito.

Corson & Lorrain	No ayuda a modificar ninguna concepción de los estudiantes.	<ul style="list-style-type: none"> -Relación entre la existencia de campos y fuerzas sobre partículas cargadas. -Relación directa entre la existencia de campo y la presencia de cargas. -Un campo eléctrico o magnético puede ser producido por una corriente eléctrica.
Purcell	<ul style="list-style-type: none"> -La corriente es un flujo de electrones. -La corriente eléctrica es energía. -La corriente está formada de partículas en movimiento. -Hay dos tipos de corriente: positiva y negativa. -La batería es una fuente de corriente. -Las cargas se encuentran almacenadas en la corriente. 	<ul style="list-style-type: none"> -Relación entre la existencia de campos y la presencia de cargas. -La intensidad del campo eléctrico y/o magnético depende de la carga que lo produce. -Las líneas de fuerza como transmisoras de las acciones eléctricas y magnéticas.
Resnick, Halliday & Krane	No ayuda a modificar ninguna concepción de los estudiantes.	<ul style="list-style-type: none"> -Relación entre la existencia de campos y la presencia de cargas y fuerzas. -Un campo eléctrico o magnético puede ser producido por una corriente eléctrica. -La corriente es un flujo de electrones. -La corriente es gastada o transformada por los elementos del circuito. - Hay dos tipos de corriente, positiva y negativa. -La corriente sale de los dos polos de la batería hacia los elementos del circuito.
Alonso & Finn	<ul style="list-style-type: none"> -La corriente se encuentra almacenada en la batería. -Las cargas se encuentran almacenadas en la batería. -No ayuda a modificar concepciones de campo eléctrico y magnético. 	-La corriente como un flujo de electrones.
Riveros	La exposición no refuerza concepciones ni ayuda a modificarlas.	

Reitz, Milford Christy &	No ayuda a modificar ninguna concepción de los estudiantes acerca de los campos eléctrico y magnético.	-Los marcos utilizados para interpretar los fenómenos en los que toman parte los campos eléctrico y magnético. (M1u, M2u, M3u) -La corriente es gastada por los elementos del circuito. -Los electrones se encuentran almacenados en la batería.
---	--	--

De la tabla anterior, se puede observar que son muchos los problemas conceptuales que se ven reforzados por la forma de exposición o la información brindada por el texto, y pocos los que pueden ser modificados. Así, los principales problemas que se ven reforzados son:

1. La relación entre la existencia del campo con la presencia de cargas o fuerzas. Este problema, se ve reforzado por casi todos los textos, debido a que en su mayoría obtienen la ecuación del campo a partir de la fuerza que sentirá una carga de prueba si es acercada a un arreglo de cargas estáticas.
2. La corriente como flujo de electrones. Son pocos los textos que explican de forma detallada un modelo de corriente microscópico, es decir, cómo se mueven los electrones, y qué es lo que los hace desplazarse.
3. Las líneas de fuerza como transmisoras de las acciones eléctricas y magnéticas. Como se ha visto, los textos que hacen referencia a la historia de la teoría electromagnética, se detienen en el trabajo de Faraday, de tal forma que enfatizan, la forma en que utilizó las líneas de fuerza. Debido a que no van más allá, para explicar el porqué no son necesarias para explicar la transmisión del campo, los estudiantes se quedan con la imagen de que hoy en día, las líneas se utilizan tal como lo hizo Faraday.

El último punto refleja cómo el mal trato de la historia, o la forma incompleta en la que es presentada por los autores, puede influenciar de forma directa las concepciones de los estudiantes. En cambio, una discusión amplia sobre las líneas de fuerza y el carácter geométrico que ahora tienen, ayudaría a cambiar el conjunto de concepciones de los estudiantes, en las cuales se ve su papel de vehículos transmisores de las acciones electromagnéticas.

De acuerdo con el análisis de los textos, en especial de las deficiencias detectadas en los diez libros analizados, en cuanto al uso de la historia en la presentación de los conceptos de campo eléctrico y magnético, y corriente eléctrica (tabla 3); así como con la identificación de los problemas conceptuales que se ven modificados o reforzados por los textos (tabla 5) y otros aspectos, es que se hará la propuesta en el siguiente capítulo.

6. Propuesta

Los capítulos dos, tres y cuatro de esta tesis, muestran el proceso mediante el cual se desarrolló la teoría electromagnética. Los tres capítulos, han plasmado el trabajo y las concepciones de algunos de los científicos que participaron en la creación de la teoría. Así mismo, muestran los principales problemas y conceptos que a lo largo de más de dos siglos atrajeron a personas como Maxwell, Lorentz y Einstein.

Por otro lado, en los capítulos cinco y siete de esta tesis, se pueden observar, en primer lugar, los marcos conceptuales que rigen el razonamiento de los estudiantes en cuanto a los fenómenos de campo electromagnético y corriente eléctrica. En segundo lugar, se ha realizado un análisis de los aspectos que los libros de texto toman en cuenta para presentar los conceptos, y cuáles de ellos pueden ser útiles para acercar a los alumnos a los modelos científicos de los conceptos analizados.

Con base en el modelo de reconstrucción educativa propuesto por Duit (2001), y partiendo del análisis y reseña histórica realizados, la propuesta a realizar girará en torno a los siguientes puntos:

1. Reconocer los conceptos más importantes para la enseñanza.
2. Establecer la relación entre los conceptos clave.
3. Determinar los contextos en los cuales se deben situar los conceptos elegidos.

Los tres puntos descritos, se realizarán bajo la consideración de que el nivel al que irán dirigidos los resultados será introductorio. Esto es, para un primer curso universitario de electricidad y magnetismo, que en la Facultad de Ciencias equivaldría al de Electromagnetismo I. Lo primero será realizar una reseña del trabajo de Duit para ubicar el proceso que nos llevará a la obtención de los elementos principales en la enseñanza de los conceptos de campo electromagnético y corriente eléctrica.

6.1. Reinders Duit: un modelo de reconstrucción educativa

"El modelo de reconstrucción educativa relaciona íntimamente las consideraciones sobre la estructura conceptual de la ciencia con el análisis del significado educativo del contenido en cuestión, y con estudios empíricos sobre los procesos de aprendizaje de los estudiantes y sus intereses." Está basado en una posición constructivista, que asume que ninguna área en particular consta de un contenido verdadero. Antes bien, el contenido de la ciencia es un consenso de una comunidad científica y el de los libros de texto una reconstrucción idiosincrática de los autores.

Una de las consideraciones de Duit, la cual es clave para este modelo, es que el análisis de la estructura de los contenidos está influenciado de la misma forma por los contenidos de la ciencia, por problemas provenientes de la filosofía e historia de la ciencia, así como por los problemas educativos.

El modelo de reconstrucción educativa, consta de tres componentes:

a. Análisis del contenido de la ciencia. El primer componente consiste en un proceso de tres fases. La primera de ellas, es llamada *elementarización*, y consiste en el análisis de los principales libros de texto y publicaciones sobre el contenido bajo inspección, pero también el análisis del desarrollo histórico de dicho contenido. Estos análisis deberán llevar a la construcción de las ideas principales del contenido y sus relaciones.

La segunda fase, incluye procesos de reconstrucción de las ideas principales identificadas y sus relaciones desde una perspectiva educativa. Esto debe incluir las metas y objetivos del aprendizaje y enseñanza del contenido elegido, así como las dificultades que presente el estudiante en el aprendizaje, y sus intereses.

Como resultado de este elemento del modelo, se tendrán las ideas elementales y sus relaciones en contextos accesibles a los estudiantes, bajo los objetivos y metas educativos. Esto implicará la idealización de algunos conceptos necesarios para el proceso de construcción del conocimiento científico, aunque no se debe abusar de ellos,

sólo utilizar los necesarios para hacer que el contenido sea comprendido fácilmente por los estudiantes.

b. Investigaciones empíricas. Este componente, comprende las investigaciones acerca de las perspectivas de los estudiantes, incluyendo las ideas previas de los estudiantes referentes al contenido y nivel elegidos. De acuerdo con el modelo, los problemas en el aprendizaje del contenido, así como los problemas cognitivos, deben ser tomados en consideración, con el fin de lograr un cambio conceptual.

c. Construcción de la instrucción. El último componente, está enfocado a la evaluación de los módulos piloto en el salón de clase. Considerando que el salón de clases es el ambiente en el que se han llevado a cabo las investigaciones a cerca de las concepciones científicas de los estudiantes.

De la descripción de los elementos del modelo de reconstrucción educativa, se aprecia que el proceso de elementarización tiene como objetivo determinar las ideas claves del contenido –en este caso campo electromagnético y corriente eléctrica-, y la relación entre ellas. Las ideas elementales, serán incluidas, en un contexto que sea de interés para el estudiante, así como comprensible.

Hay que destacar que el modelo abarca todos los aspectos de la enseñanza, desde el contenido científico, pasando por las ideas previas de los estudiantes, hasta llegar a la prueba de módulos piloto en el salón de clase.

6.2. Aplicación del modelo de reconstrucción educativa

Una vez que se ha visto a grandes rasgos el modelo de reconstrucción educativa propuesto por Duit, es necesario considerar los lineamientos a seguir en la elección de los conceptos clave y los principales problemas en la enseñanza del electromagnetismo.

Hay que indicar también que no todos los elementos del programa se aplicarán en esta tesis; sólo se realizarán los siguientes puntos:

1. A partir del análisis histórico y de los libros de texto, reconocer cuáles son los conceptos más importantes para la enseñanza. En esta parte, no será considerados sólo los conceptos, sino también los experimentos que resultaron fundamentales para la visualización de los fenómenos electromagnéticos.
2. Establecer la relación entre los conceptos clave, con base en el análisis de los libros de textos así como el histórico.
3. Con base en el análisis de las concepciones de los estudiantes, determinar los contextos en los cuales se pueden situar los conceptos clave, con el fin de que sean comprensibles y les brinden los elementos necesarios para formar sus propias concepciones.

Los tres puntos corresponden al primer elemento del modelo. Sin embargo, para el tercer punto, sólo se realizarán sugerencias de los contextos en los que pueden situarse los conceptos de importancia, así como las formas en que se pueden tomar en cuenta los problemas que presentan los estudiantes en el aprendizaje del electromagnetismo.

El análisis realizado en los tres primeros capítulos da cuenta de los conceptos más importantes para la enseñanza.

6.3. Conceptos clave y su relación en la enseñanza del campo electromagnético y la corriente eléctrica

Este apartado consiste en reconocer cuáles fueron los elementos más importantes en el desarrollo de los conceptos de campo electromagnético y corriente eléctrica y los elementos relevantes considerados por los libros de texto analizados en el capítulo 6.

Esto se presenta en tres partes. La primera de ella consiste en una breve recapitulación de los factores más importantes que llevaron a la evolución de los conceptos. De aquí se verá, la importancia y la relación entre los elementos importantes en la enseñanza de estos.

La segunda parte presenta los conceptos y elementos relevantes considerados en los textos para la exposición de los temas de campo y corriente.

En la última parte se presenta una selección de conceptos y elementos que pueden ser útiles en la enseñanza del campo y corriente eléctrica, tomando en cuenta los problemas conceptuales vistos en el capítulo 5 y aquellos que se ven reforzados por los textos analizados. Para ello se presentan dos diagramas, en los que se aprecian las relaciones entre los conceptos clave y los elementos que pueden ayudar al cambio de las ideas previas.

6.3.1. Conceptos clave en el desarrollo del campo electromagnético y la corriente eléctrica

La elección de los conceptos centrales en el desarrollo de los conceptos analizados, se analizará por etapas. Esto es, se seleccionarán los conceptos que en cada etapa del desarrollo fueron fundamentales para la experimentación y la formulación de la teoría electromagnético. Las etapas a considerar son:

1. Desde Gilbert (s. XVII) hasta Galvani (finales del siglo XVIII).

2. Del trabajo de Volta hasta la teoría de Lorentz.
3. Las aportaciones de Einstein.

Las etapas anteriores corresponden a los tres periodos históricos considerados en los capítulos 2, 3 y 4 de esta tesis.

a. Durante los siglos XVII y XVIII, los científicos se interesaron en los fenómenos de atracción y repulsión entre objetos que frotaban. Fue así, que trataron de brindar una explicación a dicho fenómeno, así como tratar de clasificar los materiales de acuerdo a su reacción al ser frotados.

El primer concepto que se tomó en cuenta fue el de la *efluvia*. Es con esta concepción que se empieza a considerar a la corriente como un fluido. El fenómeno de *atracción* constituyó la base para la elaboración de dicho concepto, así como de las teorías que trataron de explicar el mecanismo bajo el cual se atraían los cuerpos cargados eléctricamente.

El concepto de *campo magnético* como una *esfera de virtud* fue propuesto por Gilbert, y, aunque él se dedicó en parte a diferenciar los efectos magnéticos de los eléctricos, el concepto de campo magnético no fue retomado sino hasta el siglo XIX con el trabajo de Faraday y Maxwell.

Una vez que los científicos hubieron aceptado el concepto de efluvia como una propiedad de ciertos materiales, se estudió la forma de hacerla pasar de un cuerpo a otro, teniendo que buscar los materiales adecuados para transportarla. De esta forma se inicia la *conducción de la electricidad*. El estudio de la conducción de la electricidad, hizo que Franklin cambiara la idea de la efluvia por la de un fluido que pasaba a través de los materiales conductores. Así, otros científicos como Galvani y Faraday, adoptarían la misma posición. Existían dos clases de dicho fluido, uno vítreo y otro resinoso; de acuerdo a la clasificación que hiciera Dufay de las electricidades. El descubrimiento de la pila, fue un factor que ayudó a que se realizaran más experimentos de conducción, debido a la facilidad que representaba al generar una corriente.

De este período se pueden resaltar los siguientes aspectos:

1. Todas las investigaciones y explicaciones de la electricidad, tenían como origen el fenómeno de atracción.
2. A través de las propuestas sobre el mecanismo de atracción, se llega a la conclusión de la existencia de dos fluidos; con base en los cuales se logran explicar los procesos de conducción.

Aunque los conceptos bajo los cuales se realizó la investigación de esta época, son pocos, no lo son los experimentos y propuestas de mecanismos de atracción y conducción. Así, los conceptos relevantes para la enseñanza, concernientes a esta época son:

- Efluvia
- Corriente eléctrica como un fluido -dos tipos-
- Campo magnético

Ahora bien, los elementos que influyeron en el desarrollo de la teoría electromagnética, durante este período, son:

- Atracción y repulsión
- Conducción (trabajo de Franklin y Galvani)
- La pila de Volta
- Clasificación de materiales conductores y aislantes

b. A lo largo del siglo XIX, la *corriente eléctrica* jugó un papel central, como la principal conexión entre los fenómenos eléctricos y magnéticos; además de que, una parte de la investigación se dedicó al estudio de las propiedades de la corriente. A pesar de que, se descubrieron varias de sus propiedades –efectos Seebeck y Peltier- la concepción que los científicos poseían de la corriente, era la de un fluido. No es, sino hasta la introducción del *electrón* en la teoría electromagnética, que la concepción de la corriente como un fluido cambia a la concepción primero de que el fluido estaba compuesto por electrones, y después se le quita a la corriente el carácter de fluido.

La primera modificación de la teoría de corriente eléctrica, estuvo a cargo de Weber,

quien introdujo un modelo de partículas. Sin embargo, el modelo más completo fue el descrito por Lorentz. En él consideraba un tipo de *electrones libres* en los conductores, mientras que el otro permanecía fijo. El movimiento de los electrones era en dirección opuesta al de las partículas positivas, y se veía limitado debido a las colisiones con los *átomos* del material.

En cuanto al concepto de campo, este período se inicia con el trabajo de Volta y su trabajo en la conducción de electricidad en diversos materiales, así como la invención de la pila.

El descubrimiento de Oersted dio paso a una nueva etapa en la que el trabajo de los científicos, se distinguió por la variedad en cuanto a experimentos que evidenciaban la relación entre los fenómenos eléctricos y magnéticos. Es de destacarse el desarrollo de teorías que trataban de explicar la transmisión de las acciones electromagnéticas.

Una vez que se difundió el descubrimiento de Oersted, y Faraday hubo descubierto la inducción eléctrica, este último se dedicó a encontrar un mecanismo que describiera la transmisión de las acciones eléctricas. Fue así como formuló el concepto de *campo eléctrico*, el cual era una distribución de *líneas de fuerza*. Alrededor del fenómeno de campo eléctrico, surgieron otros como el de *polarización*, la cual correspondía a la dirección de las líneas de fuerza en un campo de fuerza.

El *éter* tomó el papel central en los modelos de transmisión de fuerzas, y por consiguiente en las teorías de científicos como Faraday, Maxwell y Lorentz. Sin embargo, cada uno de ellos interpretó tanto el éter como las líneas de fuerza y el fenómeno de polarización de manera distinta. Es importante resaltar, que aún el concepto de campo que adoptó cada uno, fue cambiando al tiempo que desarrollaban sus teorías.

Maxwell introduce un nuevo concepto dentro de la teoría electromagnética: la *corriente de desplazamiento*. Dicha corriente tiene su origen en la polarización de los dieléctricos, fenómeno del que diere cuenta Faraday-, y corresponde a la variación del desplazamiento eléctrico producido por la fuerza electromotriz.

Con la visión de Lorentz del campo como un estado del éter, y el experimento de Michelson y Morley se cierra la segunda etapa de análisis. El éter era el encargado de transmitir acciones entre partículas, era estático y los cambios en sus estados se debían a la presencia y movimiento de los iones.

De este período se puede resaltar que:

1. Son diversos los experimentos y fenómenos estudiados y a partir de los cuales se desarrolló la teoría electromagnética.
2. Aún cuando los científicos descubrieron muchas de las propiedades de la corriente eléctrica, no cambia su concepción de ella como un fluido, sino hasta finales del siglo XIX cuando se introduce el electrón a la teoría electromagnética.
3. El campo permaneció ligado al éter, siendo este el medio en el que se propagaban las acciones electromagnéticas.

Los conceptos que hay que tomar en cuenta de esta época, son:

- Campo eléctrico
- Éter
- Líneas de fuerza
- Corriente eléctrica
- Corriente de desplazamiento

Los elementos que ayudaron al desarrollo de dichos conceptos son:

- Deflexión de la aguja de una brújula por la acción del campo generado alrededor de un cable por el que circula corriente
- Inducción eléctrica
- Polarización
- Desarrollo de teorías que explicaban la transmisión de las acciones electromagnéticas
- El descubrimiento del electrón
- El átomo
- El experimento de Michelson y Morley

- Desarrollo de teorías acerca de la naturaleza de la corriente eléctrica
- Determinación de las propiedades de la corriente eléctrica (Ohm, Seebeck, Peltier)

c. Con Einstein, se tiene la última concepción del campo. El elemento principal que dió paso a esta nueva concepción fue la eliminación del éter.

El principio del siglo XX, fue una etapa en la que el campo eléctrico fue considerado por Einstein ontológicamente a la par que la materia, y un elemento irreducible necesario para la descripción de los fenómenos electromagnéticos, así como la materia lo era para la mecánica newtoniana.

Con lo que respecta a la corriente eléctrica, la teoría de ésta como el movimiento de electrones se consolida. El electrón para Einstein y otros científicos, era el elemento más pequeño de la electricidad.

Los conceptos en torno a los cuales, giró la teoría electromagnética a principios del siglo XX, son:

- Campo electromagnético
- Corriente eléctrica como movimiento de electrones

Otro elemento que ayudó al avance de la teoría electromagnética, es:

- La teoría de la relatividad

En los tres incisos anteriores, se detalla cuáles fueron los conceptos más importante en cada etapa del desarrollo histórico de los conceptos de campo electromagnético y corriente eléctrica; así como, los elementos que ayudaron a la evolución de estos. A continuación se muestra un esquema que resume lo anterior:

Tabla 5. Principales concepciones desarrolladas en los siglos XVII – XX.

	s. XVII - XVIII	s. XIX	s. XX
Conceptos clave	<ul style="list-style-type: none"> - Efluvia - Corriente eléctrica como un fluido (dos tipos) - Campo magnético 	<ul style="list-style-type: none"> - Campo eléctrico - Éter - Líneas de fuerza - Corriente eléctrica (diversas teorías) - Corriente de desplazamiento 	<ul style="list-style-type: none"> - Campo electromagnético - Corriente eléctrica como movimiento de electrones
Otros elementos	<ul style="list-style-type: none"> - Atracción y repulsión - Conducción (trabajo de Franklin y Galvani) - La pila de Volta - Clasificación de materiales conductores y aislantes 	<ul style="list-style-type: none"> - Inducción eléctrica - Polarización - Experimento de Oersted - Desarrollo de teorías que explicaban la propagación de las acciones electromagnéticas - El descubrimiento del electrón - El átomo - Desarrollo de teorías acerca de la naturaleza de la corriente eléctrica - Determinación de las propiedades de la corriente eléctrica (Ohm, Thomson, Seebeck, Peltier) 	<ul style="list-style-type: none"> - El experimento de Michelson y Morley

6.3.2. Conceptos clave en la presentación del campo electromagnético y la corriente eléctrica

A lo largo del capítulo 6, se realizó un análisis de la forma en que los libros de texto realizan la presentación de los conceptos de campo y corriente eléctrica, así como la influencia que tienen en las ideas previas de los estudiantes. Ya que esto se ha tratado de forma extensa, sólo presentaré una tabla que resuma los conceptos y otros elementos clave que los textos toman en cuenta para la presentación del campo y la corriente eléctrica.

Tabla 6. Principales concepciones consideradas en los libros de texto.

Texto	Campo eléctrico	Campo magnético	Corriente eléctrica	Problemas conceptuales que no ayuda a resolver
<p>Evolución de los conceptos de la Física, Arons, A.</p>	<p>-Campo eléctrico como una región en la que una partícula cargada sentirá una fuerza. -El campo es un vector que caracteriza un punto.</p>	<p>-Se define a través de la fuerza que ejerce un campo magnético sobre un cable portador de corriente.</p>	<p>-La corriente eléctrica es un movimiento de cargas. -Se presentan experimentos que dan cuenta de las características de la corriente.</p>	<p>-Relación entre la existencia de una fuerza y la presencia de un campo. -Las concepciones acerca de las líneas de fuerza. -Los modelos no científicos de corriente. -La corriente es un flujo de electrones.</p>
<p>Physics for the inquiring mind, Rogers, E.</p>	<p>-Para introducir el concepto de campo, el autor presenta algunos fenómenos electrostáticos primero. -Se define el campo como la fuerza en un coulomb de prueba situado ahí. -Las líneas de fuerza se ven como las portadoras de las acciones electromagnéticas.</p>	<p>-El campo magnético se introduce a partir de experimentos con imanes y se define como una propiedad de estos.</p>	<p>-Para explicar la corriente se hace una analogía entre esta y el flujo de agua. - Se define como un flujo de carga.</p>	<p>-Las concepciones acerca de las líneas de fuerza. -La corriente es un flujo de electrones. -La corriente está almacenada en la batería.</p>

<p>Beyond the mechanical univers, Olenick, Apóstol & Goodstein.</p>	<p>-Definición del campo eléctrico a partir de la fuerza sobre una partícula.</p>	<p>-Se introduce la visión de Faraday del campo magnético como una colección de líneas de fuerza. - El magnetismo se explica por medio del modelo de dominios. -Las líneas de fuerza son caracterizadas a partir de ciertas propiedades.</p>	<p>-Los autores parten de los circuitos eléctricos para la definición de la corriente. -Se define la corriente a partir del flujo de electrones en el interior de un cable conductor.</p>	<p>-La corriente como un flujo de energía o electrones. -Transformación y gasto de la corriente por los elementos del circuito.</p>
<p>Electromagnetism Principles & Applications, Lorrain & Corson.</p>	<p>-El campo eléctrico es la fuerza por unidad de carga ejercida en una carga de prueba.</p>	<p>-Se indica que el campo magnético se puede describir al igual que el eléctrico, mediante las líneas de B.</p>	<p>-La corriente eléctrica corresponde al arrastre de los portadores de carga por un campo eléctrico.</p>	<p>-Relación entre la existencia de campos y la presencia de fuerzas o cargas.</p>
<p>Electricity & Magnetism, Purcell.</p>	<p>-El campo eléctrico es un campo vectorial, y corresponde a la influencia de un arreglo de cargas sobre una carga determinada. -Las líneas de campo son una ayuda para visualizar el campo.</p>	<p>- El experimento de Oersted corresponde a la introducción del campo magnético. -El campo magnético es el espacio que permea el espacio circundante a una corriente eléctrica.</p>	<p>-Una corriente es causada por el movimiento de los portadores de carga.</p>	<p>-Relación entre la existencia de campos y la presencia de cargas. -Las líneas de fuerza como transmisoras de las acciones eléctricas y magnéticas.</p>

<p>Física, vol. 2, Halliday, Resnick & Krane.</p>	<p>-La presentación del campo se lleva a cabo mediante una analogía entre el campo gravitatorio y el eléctrico. -Se define el campo en analogía con el gravitatorio como fuerza por unidad de carga. -Las líneas de fuerza se utilizan como una forma de representar el campo eléctrico.</p>	<p>-El campo magnético es el espacio alrededor de un imán o de un conductor por el que circula una corriente.</p>	<p>-La corriente es el flujo de carga en un conductor, y se define como la cantidad de carga que pasa por una superficie en un intervalo de tiempo.</p>	<p>-Relación entre la existencia de campos y la presencia de cargas y fuerzas. -La corriente como un flujo de electrones. - La corriente es gastada o transformada por los elementos del circuito. -La corriente sale de los dos polos de la batería hacia los elementos del circuito.</p>
<p>Física vol. II, Alonso & Finn.</p>	<p>-El campo eléctrico es una región del espacio en donde una carga experimenta una fuerza. -Las líneas de fuerza son una forma de representar el campo.</p>	<p>-Un campo magnético es producido por un cuerpo magnetizado alrededor de él.</p>	<p>-La corriente es un chorro de partículas cargadas que se mueven en una dirección debido a la presencia de un campo eléctrico.</p>	<p>-La corriente como un flujo de electrones.</p>
<p>Electricidad y Magnetismo, Riveros, H.</p>	<p>-La presencia de una carga establece un campo eléctrico en sus alrededores.</p>	<p>-El campo magnético se establece en los alrededores de un imán. -Las líneas de fuerza se utilizan para representar el campo.</p>	<p>-La corriente eléctrica es la cantidad de carga que pasa en un intervalo de tiempo a través de una sección del conductor.</p>	<p>-No refuerza ninguna concepción.</p>

<p>Fundamentos de la teoría electromagnética, Reitz, Milford & Chrsisty.</p>	<p>-El campo es el límite de la fuerza sobre una prueba de carga, y se toma el límite cuando la carga de prueba tiende a cero. -El campo es una función vectorial. -Las líneas de fuerza ayudan a visualizar el campo eléctrico.</p>	<p>-El campo magnético se introduce a partir de los hechos históricos que llevaron a su descubrimiento -Se define el campo magnético en analogía con el eléctrico, pero tomando en cuenta la velocidad de la carga de prueba.</p>	<p>-La corriente es carga en movimiento. -Se define como la velocidad a la que se transporta la carga a través de una superficie dada del conductor.</p>	<p>-Los marcos utilizados para interpretar los fenómenos en los que toman parte los campos eléctrico y magnético. -La corriente es gastada por los elementos del circuito. -Los electrones se encuentran almacenados en la batería. -La corriente es un flujo de electrones.</p>
<p>Classical Electromagnetic Theory, Vanderlinde.</p>	<p>-El campo eléctrico y magnético son introducidos con una pequeña reseña histórica. -El campo eléctrico es definido como fuerza por unidad de carga.</p>	<p>-El campo magnético es una consecuencia relativista, al tomar en cuenta la velocidad de la carga de prueba.</p>	<p>-No tratan el tema de corriente eléctrica.</p>	<p>-No refuerza ninguna concepción.</p>

De la tabla anterior, y del análisis realizado en el capítulo 6, se puede observar que los autores se centran en los conceptos de campo eléctrico, campo magnético y corriente eléctrica, sin tomar en cuenta, la mayoría de la veces, aspectos históricos o experiencias que ayuden a una mejor comprensión de los conceptos.

De aquí, que los conceptos relevantes en la exposición del campo electromagnético y la corriente eléctrica son:

- Campo eléctrico como la fuerza sobre una carga eléctrica

- Líneas de fuerza
- Campo magnético
- Corriente eléctrica como un flujo de electrones

Por otro lado, la tabla también muestra un resumen de las principales problemas conceptuales presentes en los estudiantes, que los textos no ayudan a resolver. Estos son:

- Relación entre la existencia de un campo y la presencia de fuerzas o cargas.
- Las concepciones sobre las líneas de fuerza -transmisoras del campo electromagnético-.
- Los modelos no científicos de corriente.
- La corriente es un flujo de electrones o energía.
- La corriente está almacenada en la batería.
- Transformación y gasto de la corriente por los elementos del circuito.
- La corriente está almacenada en la batería.

6.3.3. Relación entre los conceptos claves para la enseñanza del campo electromagnético y la corriente eléctrica, y las ideas previas

En los dos apartados anteriores, se determinaron las concepciones relevantes durante la evolución y en la presentación de los conceptos de campo eléctrico y corriente eléctrica. Sin embargo, los conceptos de campo y corriente, son interpretados de distinta forma tanto por los libros de texto, como por los científicos que desarrollaron la teoría electromagnética. Es por ello, que en este apartado además de determinar cuáles son los conceptos que hay que tomar en cuenta en la enseñanza del campo y la corriente eléctrica, mencionaré la forma en que pueden ser considerados. También se verá la relación y secuencia en la que pueden ser tratados, de tal forma que esto ayude a cambiar las concepciones de los estudiantes analizadas en el capítulo 5.

Los **campos eléctrico y magnético**, pueden ser considerados como Einstein lo hizo; como una entidad básica, necesaria para la explicación de los fenómenos eléctricos y magnéticos, tomando en cuenta sus propiedades, como la energía y momento. Debido a que algunas concepciones de los estudiantes son similares a algunas que sostuvieron los científicos de los siglos XVI – XX, se considerarán algunos de los conceptos y momentos clave en la historia que ayudaron a cambiar las primeras concepciones, para llegar a la que poseía Einstein.

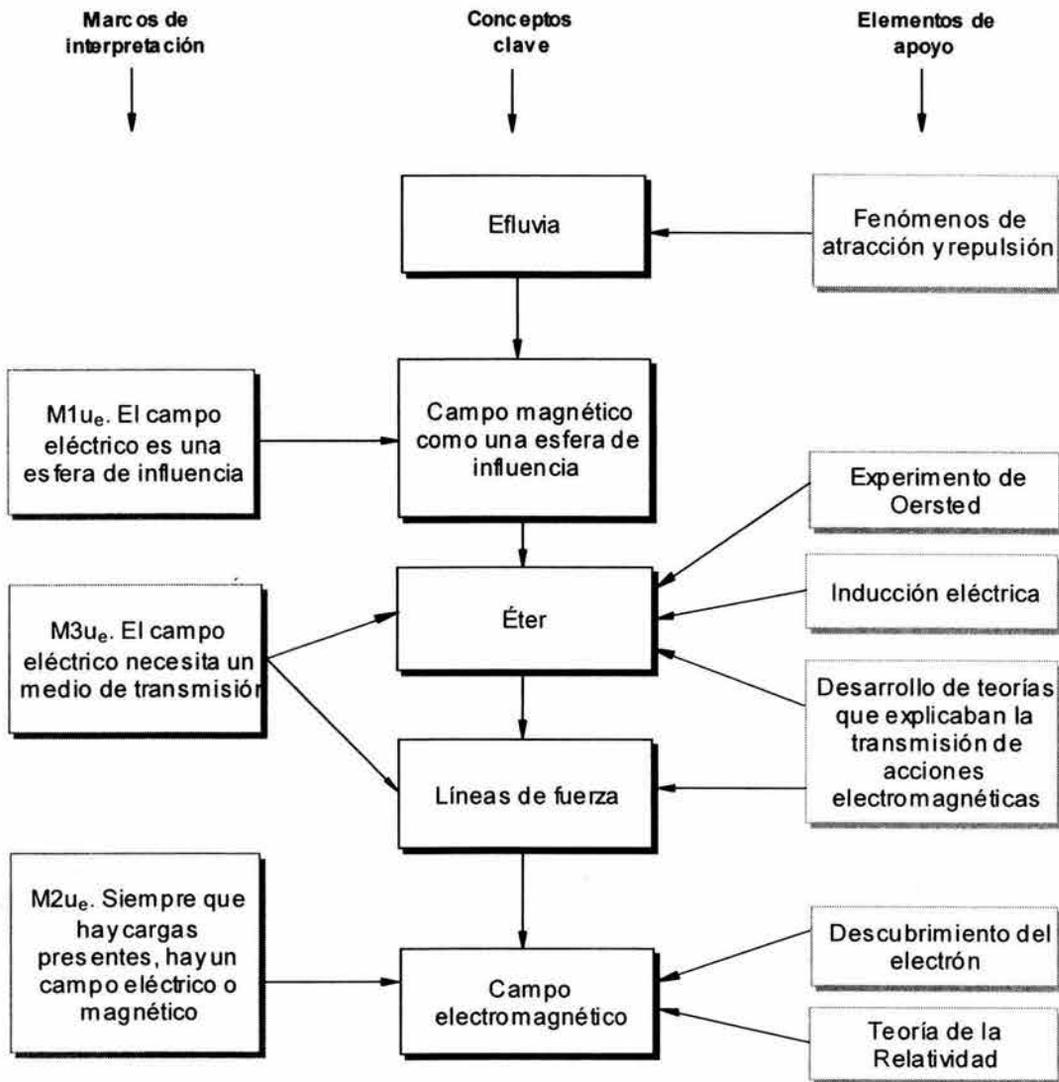
En la gráfica siguiente, se muestran los **conceptos clave**, en torno a los cuales se sugiere basar la enseñanza del campo electromagnético, los **elementos que ayudaron a la explicación** o cambio de los conceptos, y, por último, los **marcos** que utilizan los estudiantes para explicarse el campo eléctrico y magnético.

La secuencia en la que se sugiere enseñar los elementos y conceptos, está indicada por la dirección de las flechas que unen los conceptos clave.

Los marcos están relacionados a los momentos históricos cuyo análisis puede llevar a los estudiantes a cambiar el grupo de concepciones encerradas en cada marco.

Es importante hacer énfasis en que la parte central en la enseñanza, queda señalada por los **conceptos clave**. El análisis de los **elementos de apoyo** pueden ayudar a los estudiantes a comprender el porqué de la creación de dichos conceptos, o lo que llevó a los científicos a un cambio en sus interpretaciones.

De igual forma, los **conceptos clave**, fueron elegidos de la secuencia histórica del desarrollo del concepto de campo, tomando en cuenta tanto los elementos considerados en los libros de texto, como las concepciones de los estudiantes.



Esquema 5. Concepciones relevantes en la enseñanza de los campos eléctrico y magnético.

El esquema anterior, inicia con los fenómenos de atracción y repulsión, al igual que los hace Rogers en su exposición. Estos fenómenos, constituyeron el inicio del estudio del campo, por lo que su análisis puede mostrar el porqué se consideró a la electricidad como una sustancia y al campo magnético como una esfera de influencia.

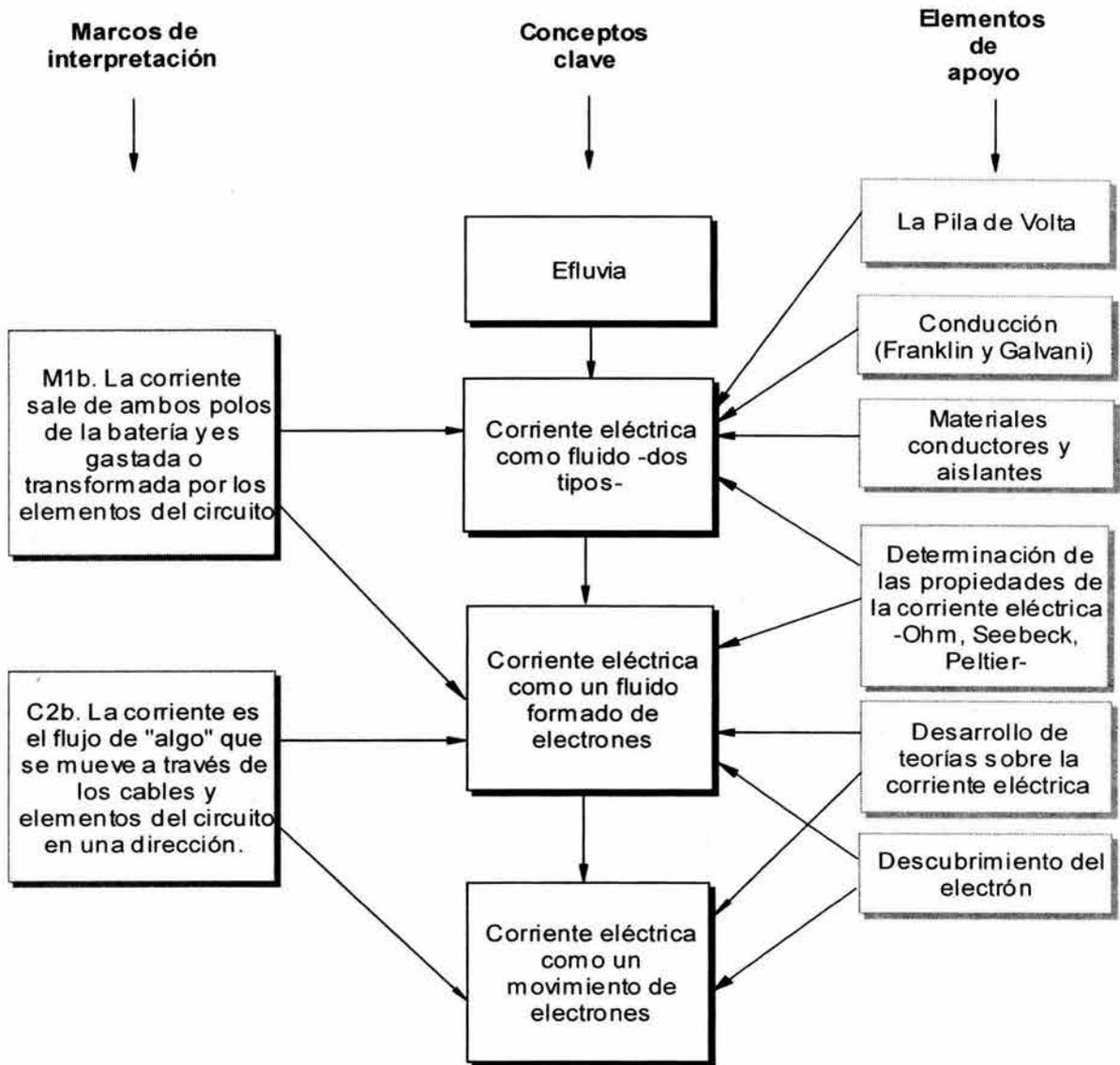
Los diversos experimentos, como el de Oersted, hicieron surgir al éter como uno de los elementos centrales de la teoría electromagnética. La importancia de la introducción del

éter en la enseñanza del campo y el análisis de los elementos que ayudaron a eliminarlo, se encuentra en que, varias investigaciones (Bar, V., Zinn, B. & Rubin, E. 1997, Pocius & Finley, 2002) se reporta que los estudiantes consideran la necesidad de un medio para la transmisión del campo.

En esta parte, se puede analizar lo que llevó a Faraday a la consideración de un éter, y a otros científicos a la creación de distintas teorías sobre la transmisión de las acciones electromagnéticas. Una vez que los estudiantes tengan estos antecedentes, se verá cómo la teoría de la relatividad y el descubrimiento del electrón lograron cambiar de forma radical la concepción del campo electromagnético.

El marco 3, $-M2u_e-$, responde a la tendencia de algunos textos (Resnick, et. al., Alonso & Finn) de presentar el campo como una interacción entre cargas estáticas. Este marco, puede ser cambiado mediante el análisis cuidadoso de los conceptos y elementos propuestos en el esquema, cuidando de no considerar cada parte de forma aislada, sino de manera global, como un proceso que llevó al concepto de campo electromagnético. Lo anterior, atendiendo a la problemática de que la mayoría de las veces, sólo se toma en cuenta la última parte del proceso de evolución, es decir, sólo se toma en cuenta la teoría de electrones para enseñar el campo eléctrico.

Ahora bien, se sugiere que la **corriente eléctrica** sea considerada como el movimiento de electrones de un conductor originado por la presencia de un campo eléctrico. Una vez que dicho campo desaparece, el movimiento también. Esto, en contraste con la concepción que los estudiantes poseen: un fluido. El esquema 6 considera los mismos elementos que se tomaron en cuenta para el de campo –esquema 5-.



Esquema 6. Concepciones relevantes en la enseñanza de la corriente eléctrica.

Del esquema anterior, hay que resaltar la relevancia del análisis global del esquema con el fin de lograr un cambio en el marco y categoría que se indican. Esto se debe a que cada elemento del desarrollo del concepto de corriente, es tomado en cuenta para formarse un modelo de corriente; desde la forma en que se genera –pila de Volta-, hasta su naturaleza –teoría de electrones-.

Ya que, la concepción de la corriente como un fluido se mantuvo desde el siglo XVII hasta finales del s. XIX, es importante hacer énfasis en la forma en que cambió esta concepción

con el descubrimiento del electrón, y la modificación de las distintas teorías sobre la corriente.

6.3.4. Contextos adecuados para la enseñanza del campo electromagnético y la corriente eléctrica

En los esquemas 5 y 6, se puede apreciar que uno de los contextos adecuados para enseñar los conceptos de campo y corriente eléctrica, es la historia; es decir los aspectos históricos en los que se crearon y en donde se dieron las condiciones necesarias para que evolucionaran.

Ahora bien, no se trata sólo de narrar cómo se llevaron a cabo los descubrimientos y mencionar científicos y fechas; antes bien, es necesario hacer varias consideraciones del contexto histórico en el que se sitúan los conceptos. Algunas de ellas son:

1. El recorrido histórico debe ser breve, pero resaltando las ideas principales. Esto es, no sólo dando fechas y nombres de científicos con sus descubrimientos, sino una contexto que de idea de la actividad de los científicos, así como del proceso que les llevó a crear las concepciones indicadas en los esquemas 5 y 6. Un ejemplo de esto, sería explicar porqué Faraday veía la necesidad de crear un éter en el que se propagaran las interacciones electromagnéticas.
2. Resaltar que la teoría electromagnética no sólo es el trabajo de Maxwell, o de un solo científico, sino que, fueron muchos los que colaboraron en el desarrollo de los conceptos de campo y corriente eléctrica. Además, hay que hacer énfasis en que las contribuciones no son sólo de un tipo; por ejemplo, en el concepto de campo, algunos científicos contribuyeron elaborando teorías que dieran cuenta de la forma en que se transmitían las acciones electromagnéticas, pero, el descubrimiento del electrón, y la teoría de la relatividad fueron también contribuciones cruciales en el concepto einsteiniano del campo.

3. Una atención especial, debe dirigirse a los momentos en los que se dieron cambios radicales en los conceptos. Estos momentos, están indicados en los esquemas 5 y 6 con los conceptos en recuadros negros. Además de estos momentos, analizar la forma en la que los experimentos y otros elementos ayudaron a cambiar dichas concepciones. Un ejemplo de esto, es que la corriente eléctrica había sido considerada como un fluido desde el s. XVII, y no fue, sino hasta finales del s. XIX, que la introducción de los electrones en la teoría electromagnética ayudó de forma contundente a cambiar dicha concepción al de la corriente como un movimiento de electrones.

Generalmente, las concepciones que cambian en estos momentos cruciales, corresponden también a algunas de las sostenidas por los estudiantes. Por lo que, enfatizar los cambios, puede ayudar a modificar las concepciones de los estudiantes.

4. La presentación de la historia, debe hacerse de una manera completa; ya que, una presentación parcial de la historia puede originar ideas erróneas en los estudiantes acerca de lo que pasó, además de una distorsión de los conceptos. (Pocovi & Finley, 2003) Esto sucede en algunos de los textos analizados, como en el Purcell, en el cual se omiten algunas de las contribuciones y concepciones de los científicos, dando una imagen errónea del desarrollo de los conceptos. Por lo tanto, la historia que se presente en los textos, deberá estar bien documentada.
5. A lo largo del desarrollo de los conceptos de campo y corriente, algunos científicos se valieron de analogías para explicar algunos fenómenos. Sin embargo, las analogías utilizadas en los textos analizados, no son explicadas del todo. Es por esta razón, que considero que las analogías deben dejarse de lado en la exposición de los textos. De acuerdo con Cosgrove y Osborne (2003), una analogía sencilla puede dar una apariencia de realidad a la corriente como sustancia, y una analogía compleja puede dar como resultado más confusión que no emplear ninguna analogía.
6. Por último, es necesario reconocer que aunque la enseñanza de los conceptos de

campo y corriente se sitúen en un contexto histórico, y se tomen en cuenta todas las consideraciones mencionadas, no hay que olvidar que no se puede esperar un cambio en las ideas previas de los estudiantes con sólo esto. En especial en la enseñanza de la corriente eléctrica, para la cual existen diversas estrategias (Cosgrove & Osborne, 1998) diseñadas para un cambio conceptual y que se basan tanto en actividades experimentales como en intercambio de ideas y discusiones guiadas por el profesor.

7. Conclusiones

A lo largo de esta tesis, se desarrollaron tres aspectos relacionados con los conceptos de campo electromagnético y corriente eléctrica. El primero, consistió en un recorrido histórico acerca de su evolución, partiendo del trabajo de Gilbert en el siglo XVII, hasta el de Einstein, en el siglo XX. De este análisis, se destaca lo siguiente:

1. El concepto de campo fue, en un principio, sólo un medio para facilitar la explicación de los fenómenos eléctricos desde un punto mecánico.
2. Los modelos y analogías jugaron un papel importante dentro de la creación de la teoría electromagnética.
3. La experimentación fue un elemento relevante en la construcción de la teoría electromagnética.
4. Los modelos y teorías realizadas con el fin de dar cuenta tanto de la propagación de las acciones electromagnéticas como del mecanismo y naturaleza de la corriente eléctrica, fueron numerosas. Estos modelos y teorías, fueron objeto de una evolución constante.

La formación de los conceptos no fue fácil, y es de notarse que a lo largo de los siglos XVII – XX, las concepciones que predominaron son:

- La corriente eléctrica como un fluido.
- Las acciones electromagnéticas necesitan de un medio para su propagación.

El segundo aspecto, lo constituyó un análisis de las concepciones de los estudiantes de bachillerato y universidad acerca de ambos conceptos. A través de él, se logró dar cuenta de los marcos bajo los cuales interpretan los fenómenos electromagnéticos.

Aunado a ello, se establecieron algunas de las características de las ideas previas, así como de su relación tanto con los libros de texto como con la historia. Es aquí, donde se puede observar con detalle cuáles son las ideas previas de los estudiantes que presentan similitudes con aquellas concepciones sostenidas por los científicos durante el período

histórico analizado previamente. Un ejemplo de esto, es la concepción de la corriente eléctrica como un fluido, y la necesidad de un medio para la propagación del campo electromagnético.

El último aspecto, consistió en el análisis de la forma en que presentan los conceptos diez libros de texto de nivel universitario. La diversidad en los textos seleccionados, hizo evidente varios aspectos:

1. La historia no es considerada en la mayoría de los textos. Sin embargo, aquellos que la consideran, no logran ligarla a los conceptos, es decir, no establecen las dificultades o el proceso que llevó a los conceptos de campo y corriente que se tiene hoy día. Antes bien, algunos de ellos, sólo presentan la historia como una colección de científicos y sus aportaciones.
2. La presentación del concepto de campo, es similar en todos los textos, y está basada en un arreglo de cargas estáticas.
3. El campo magnético es presentado por algunos textos como un efecto de los imanes, y por otros -los de nivel de Física Teórica, principalmente-, como un efecto relativista.
4. A pesar de que, la relatividad de Einstein, fue crucial para la determinación del concepto de campo, no es mencionado por los textos.
5. La corriente eléctrica, al igual que el campo, es tratada de forma similar en los textos, aunque algunos profundizan un poco en algún modelo de conducción.

Aunado a los puntos anteriores, se tiene que, son pocas las ideas previas de los estudiantes que pueden ser modificadas con el apoyo de los textos. Algunos de ellos, no ejercen influencia alguna, o bien, fortalecen ideas no deseables en los estudiantes.

De igual forma, la presentación de los conceptos no brinda elementos a los estudiantes para que reelaboren o transformen sus propios conceptos. De hecho, los limita al presentar situaciones específicas -como es la fuerza sobre una carga de prueba que ejerce un arreglo de cargas, en el caso del campo eléctrico-, sin ir más allá o hacer claro porqué se trata de un caso particular.

Por otro lado, la mayoría de los libros no hace explícito y, a su vez, explica un concepto de campo o corriente eléctrica, quedándose sólo en la expresión matemática de los

fenómenos.

Del análisis de los textos, se puede concluir, que no sólo no ayudan a modificar las ideas previas de los estudiantes, sino que la forma en que presentan los dos conceptos, puede generar concepciones erróneas. Debido a lo anterior, se puede decir, que los textos no están contribuyendo a que los estudiantes se formen una concepción clara y adecuada de campo o corriente eléctrica.

Ahora bien, la relación entre los aspectos planteados, quedó expresada en la propuesta realizada en el capítulo 7. En ella, se presentan, en primer lugar, los conceptos relevantes para la enseñanza de los dos conceptos -campo y corriente-. En segundo lugar, se establece cómo a través de la presentación de la evolución histórica de los conceptos, se pueden cambiar algunas de las concepciones de los estudiantes, mostrándoles cómo cambiaron dichas concepciones, porqué fue necesario cambiarlas, y por cuáles fueron cambiadas. Hecho, que no se podría lograr, sin la inclusión y análisis de la historia en la exposición del tema.

De la propuesta, se pueden resaltar los siguientes puntos:

1. Los elementos que los textos toman en cuenta para la exposición del campo y la corriente, son pocos y quedan incluidos totalmente en los conceptos relevantes seleccionados del análisis histórico.
2. La historia brinda una base para la enseñanza del campo y la corriente.
3. Los elementos elegidos responden a los problemas conceptuales de los estudiantes, por lo que un análisis adecuado de ellos puede ayudar a cambiar los marcos establecidos en los esquemas 5 y 6. En estos esquemas, se explica la forma en la que puede influir cada uno de los elementos a modificar las concepciones de los estudiantes.

Retomando algunos aspectos de la presentación y uso de los textos en el aula, se tienen las siguientes recomendaciones para la creación de un libro de texto:

- En primer lugar, es necesario realizar un análisis y selección de la información que se va a presentar. Un análisis histórico es necesario, debido a que momentos claves, en los que se registraron cambios en las concepciones de los científicos, pueden ayudar

al cambio en las concepciones de los estudiantes.

- Tomar en cuenta las concepciones de los estudiantes. Hay que recordar que los textos van dirigidos a los estudiantes, y por lo tanto, tomar en cuenta sus concepciones, permitirá al escritor presentar el tema de tal forma que sea un verdadero apoyo al estudiante, ayudándolo a modificar sus ideas previas, y a construir concepciones adecuadas.
- Vincular el aspecto matemático de la teoría con la parte conceptual, de manera que se aprecie que ambas partes forman un todo. Así, la parte histórica y el desarrollo conceptual deben ir unidos a la formulación matemática, dándole al desarrollo conceptual un sentido, una lógica a la formulación matemática. En algunos textos de los analizados en esta tesis, se puede apreciar, que la historia es tratada como un tema aparte, y se deja de lado al momento de adentrarse en el desarrollo matemático.
- Presentar de forma equilibrada el desarrollo teórico del tema y la formulación matemática; con el objetivo de mostrar al estudiante que ambos aspectos poseen la misma importancia.

Sin embargo, no sólo es importante tomar en cuenta ciertos factores al momento de escribir un texto, sino también al momento de utilizarlo. Es por ello, que presento las siguientes recomendaciones para los profesores:

- Considerar las concepciones previas de los estudiantes. Ello le permitirá elegir entre los textos más adecuados y estrategias de enseñanza para ayudar a resolver algunos de los problemas conceptuales.
- Realizar un análisis crítico de la presentación que del mismo tema realizan varios libros, de tal forma que el permita elegir el más adecuado, o el que más se ajuste a las necesidades del grupo -una vez que se han considerado las ideas previas de éste-
- Guiar a los estudiantes para que realicen un estudio crítico. Esto es, que al leer los textos, analicen los conceptos que presentan y la forma en la que lo hacen. De tal forma que la lectura no les lleve a una memorización, sino a una comprensión y análisis del texto.

De lo anterior, es necesario resaltar que las ideas previas de los estudiantes, deben dar la

pauta, tanto al escritor de los libros de texto como al maestro para decidir acerca del material y la información a utilizar en la enseñanza de cada tema.

En cuanto a los alumnos se refiere, es parte del papel de los profesores, como mencioné en los puntos anteriores, guiar a sus estudiantes para que realicen una lectura crítica de los textos, y reflexionen acerca de los fenómenos y los conceptos, y no sólo enfocarse al lado práctico, a la formulación matemática de los temas.

8. Referencias

Medios impresos

- Andrés, M. (1990) Evaluación de un plan instruccional dirigido hacia la evolución de las concepciones de los estudiantes acerca de circuitos eléctricos. Enseñanza de las Ciencias, 8(3), 231-237.
- Arons, A. B. (1990) A guide to introductory Physics Teaching. Citado en Serouglou, F. & Koumaras, P. (2001) The contribution of the History of Physics in Physics Education: A review. En Bevilacqua, F. & Giannetto, E. (Eds.) The contribution of history and philosophy of science, (327-346) Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Ausubel, D., Novak, J. & Hanesian, H. (1980) Psicología educacional. Citado en Sequeira, M. & Leite, L. (1991) Alternative conceptions and history of physics teacher education. Science Education, 75(1), 45-56.
- Bar, V., Zinn, B. & Rubin, E. (1997) Children's ideas about action at a distance. International Journal of Science Education, 19(10), 1137-1157.
- Benseghir, A. (1989) Transition Electrostatique-Electrocinetique: Point de vue historique et analyse des difficultes des élèves. Citado en Serouglou, F. & Koumaras, P. (2001) The contribution of the History of Physics in Physics Education: A review. En Bevilacqua, F. & Giannetto, E. (Eds.) The contribution of history and philosophy of science, (327-346) Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Benseghir, A. & Closset, J. (1996) The electrostatics-electrokinetics transition: historical and educational difficulties. International Journal of Science Education, 18(2), 179-191.
- Bergmann, P. (1982) The quest for unity: General relativity and unitary field theories. En Holton, G. & Elkana, Y. (Eds.) Albert Einstein: Historical and Cultural Perspectives, (pp. 27 – 38), Estados Unidos: Princeton University Press.
- a. Borges, A. & Gilbert, J. (1999) Models of Electricity. International Journal of Science Education, 21(1), 95-117.
- b. Borges, A. & Gilbert, J. (1999) Models of Magnetism. International Journal of

Science Education, 20(3), 361-378.

- Bromberg, J. (1976) The concept of particle creation before and after Quantum Mechanics. En McCormach, R. (Editor), Historical Studies in the Physical Sciences: Vol. 7. (pp. 161-191). Estados Unidos: Princeton University Press.
- Buchwald, J. (1988). The Michelson experiment in the light of Electromagnetic Theory before 1900. En Goldberg, S. & Stuewer, R. (Eds.), American Institute of Physics Conference Proceedings 179. The Michelson Era in American Science 1870 – 1930, (pp. 55- 70), Estados Unidos: American Institute of Physics.
- Colombo de Cudmani, L. & Fontdevilla, P. (1990) Concepciones previas en el aprendizaje significativo del electromagnetismo. Enseñanza de las Ciencias, 8(3), 215-222.
- Cosgrove, M. & Osborne, R. (1998) Secuencia de enseñanza sobre la corriente eléctrica. En Osborne, R. & Freyberg (Eds.), El aprendizaje de las ciencias: Implicaciones de las ideas previas de los alumnos (pp. 185-205), Madrid: Editorial Narcea.
- Coulston C. (Ed), (1980). Dictionary of Scientific Biography (vols. 3,4,9,10,13,14). Estados Unidos: Charles Scribner's sons.
- Cushing, J. (1998). Philosophical concepts in Physics. The historical relation between Philosophy and Scientific Theories , Gran Bretaña: Cambridge University Press.
- Dall'Alba, G., Walhs, E., Bowden, J., Martin, E., Masters, G., Ramsden, P. & Stephanou, A. (1993) Textbook Treatments and Students' Understanding of Acceleration. Journal of Research in Science Teaching, 30(7), 621-635.
- DeBoer, G. (2000) Scientific literacy: another look at its historical and contemporary meanings and its relationship to science education reform. Journal of Research in Science Teaching, 37(6), 582-601.
- De Posada, J. (1997) Conceptions of high school students concerning the internal structure of metals and their electric conduction: structure and evolution. Science Education, 81 (4), 445-467.
- Dirac, P. (1958). The principles of Quantum Mechanics (4ª edición), Gran Bretaña: Clarendon Press.
- Driver, R. (1981) Pupils' alternative frameworks in science. European Journal of

Science Education, 3, 93-101.

- Driver, R. Guesne, E. & Tiberghien, A. (1985) Children's ideas in science. En Flores, F., López, A. & Gallegos, L. (2001) Elementos y parámetros de organización de las ideas previas. Trabajo no publicado.
- Duit, R., Jung, W., & vonRhöneck, C. (1985). Aspects of understanding electricity. Citado en Mulhall, P., McKittrich, B. & Gunstone, R. (2001) A Perspective on the resolution of Confusions in the Teaching of Electricity. Research in Science Education, 31, 575- 587.
- Duit, R., (2001, agosto) Educational Reconstruction: Science subject matter and educational issues in harmony research and development intimately linked, Ponencia presentada en la Conferencia de la European Science Education Research Association, Tessaloniki.
- Dupin, J. & Joshua, S. (1987). Conceptions of French pupils concerning electric circuits: Structure and evolution. Journal of Research in Science Teaching, 24, 791-806.
- Einstein, A. (1983). Mis ideas y opinions, (Alvarez, J. & Golder, A. trads.) España: Bosch, Casa Editorial.
- Einstein, A. (1979). On the electrodynamics of moving bodies. En French, A. (Ed.) Einstein: A centenary volume, Estados Unidos: Harvard University Press.
- Einstein, A. (1954). Relativity, The special and the general theory a popular exposition. (Lawson, R. trad.) Gran Bretaña: Methuen.
- Einstein, A. (1983). Sidelights on Relativity, Estados Unidos: Dover Publications.
- Einstein, A. & Infeld, L. (1939). La física, aventura del pensamiento, (Grinfeld, R. Trad.), (14ª ed.) Argentina: Losada.
- Eylon, B. & Ganiel, U. (1990) Macro-micro relationships: the missing link between electrostatics and electrodynamics. International Journal of Science Education, 12(1), 79-94.
- Faraday, M. (1839). Experimental Researches in electricity (vols. I, II, III), London: Richard and John Edward Taylor.
- Flores, F., López, A. & Gallegos, L. (2001) Elementos y parámetros de organización de las ideas previas. Trabajo no publicado.
- Fredette, N. & Lochhead, J. (1980). Student conceptions of simple circuits. The

Physics Teacher, 18, 194-198.

- Furió, C. & Guisasola, J. (1998a). Difficulties in learning the concept of electric field. Science Education, 82(4), 511-526.
- Furió, C. & Guisasola, J. (1998b) Dificultades de aprendizaje de los conceptos de carga y de campo eléctrico en estudiantes de bachillerato y universidad. Enseñanza de las Ciencias, 16(1), p. 131-146.
- Gagliardi, R. & Giordan, A. (1986) La historia de las ciencias: una herramienta para la enseñanza. Enseñanza de las Ciencias, 4(3), 253-258.
- Gentner, D. & Gentner, D. (1983) Flowing waters or teeming crowds: mental models of electricity. En Gentner, D. & Stevens (Eds.). Mental Models (pp. 99 – 129). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, Publishers.
- Gilbert, W. (1958) De Magnete, (Mottelay, F. trad.) Estados Unidos: Dover Publications.
- Gilbert, J. K. & Watts, D. M. (1983) Concepts, misconceptions and alternative conceptions: changing perspectives in Science Education. Citado en Flores, F., López, A. & Gallegos, L. (2001) Elementos y parámetros de organización de las ideas previas. Trabajo no publicado.
- Greca, I. M. & Moreira, M. A. (1998). Modelos mentales y aprendizaje de la Física en Electricidad y Magnetismo. Enseñanza de las Ciencias, 16(2), p. 289-303.
- Gusti, B. (1975) Field Theory in 19th-century Britain. En McCormach, R. (Editor), Historical Studies in the Physical Sciences: Vol. 6. (pp. 206-260). Estados Unidos: Princeton University Press.
- Harman, P. (1995) Energy, Force, and Matter The conceptual development of nineteenth-century Physics (7^a reimpresión), Gran Bretaña: Cambridge University Press.
- Heilbron, J. L. (1982) Elements of early modern Physics, Estados Unidos: University of California Press.
- Hesse, M. (1970) Forces and Fields: the concept of action at a distance in the history of physics, Estados Unidos: Greenwood Press.
- Hoyle, F. & Narlikar, J. (1974) Action at a distance in Physics and Cosmology, Estados Unidos: Freeman and Company.
- Jost, R. (1972) Foundation of Quantum Field Theory. En Salam, A. & Wigner, E.

(Eds.) Aspects of Quantum Theory, (61 – 77), Gran Bretaña: Cambridge University Press.

- Kallunki, V. (2001). From electrostatics to the circuits of the pile: experimentality and models in concept formation. Tesis de licenciatura, Universidad de Helsinki, Helsinki, Finlandia.
- Kuhn, T. (1962) The structure of scientific revolutions. Citado en Stinner, A. (1992). Science Textbooks and Science Teaching: From Logic to Evidence. Science Education, 76(1), 1-16.
- Lee, Y. & Law, N. (2001) Explorations in promoting conceptual change in electric concepts via ontological category shift. International Journal of Science Education, 23(2), 111-149.
- Lorentz, H. (1952) The theory of electrons and its applications to the phenomena and radiant heat, (2^a ed.), Estados Unidos: Dover Publications.
- Lybeck, L., Marton, F., Strömdahl, H. & Tullberg, A. (1988) The phenomenography of the "mole concept" in chemistry. In P. Ramsden (Ed.) Improving learning: New perspectives (pp. 81-108). Londres: Kogan Page.
- Maxwell, J. (1998) A treatise on electricity and Magnetism (3^a ed., vols. I, II), Estados Unidos: Oxford University Press.
- Miller, A. (1982) The Special Relativity Theory: Einstein's response to the Physics of 1905. En Holton, G. & Elkana, Y. (Eds.), Albert Einstein: Historical and Cultural Perspectives. (pp. 3 – 26), Estados Unidos: Princeton University Press.
- Mulhall, P., McKittrich, B. & Gunstone, R. (2001) A Perspective on the resolution of Confusions in the Teaching of Electricity. Research in Science Education, 31, 575-587.
- Musheno, B. & Lawson, A. (1999) Effects of learning cycle and traditional text on comprehension of science concepts by students at differing reasoning levels. Journal of Research in Science Teaching, 36(1), 23-37.
- Nersessian, N. (1984). Faraday to Einstein: Constructing Meaning in Scientific Theories. Países Bajos: Martinus Nijhoff Publishers.
- Nersessian, N. (1988). "Ad Hoc" is not a four-letter word: H. A. Lorentz and the Michelson–Morley experiment. En Goldberg, S. & Stuewer, R. (Eds.), American Institute of Physics Conference Proceedings 179. The Michelson Era in American

- Science 1870 – 1930, (pp. 55- 70), Estados Unidos: American Institute of Physics.
- Otero, J. C. & Campanario, J. M. (1990) Comprehension evaluation and regulation in learning from science texts. Journal of Research in Science Teaching, 5 (27), 447-460.
 - Papp, D. (1961) Historia de la Física, Desde la antigüedad hasta los umbrales del siglo XX, España: Espasa-Calpe.
 - Pocovi, M. & Finley, F. (2002) Lines of force: Faraday's and students' views. Science & Education, 11, 459-474.
 - Pozo, J. & Gómez Crespo, M. (2000) Aprender y enseñar ciencia, España: Ediciones Morata.
 - Rodrigo, M. (1997) Del escenario sociocultural al constructivismo episódico: un viaje al conocimiento escolar de la mano de las teorías implícitas. Citado en Pozo, J. & Gómez Crespo, M. (2000) Aprender y enseñar ciencia, España: Ediciones Morata.
 - Rodrigo, M. & Correa, N. (1999) Teorías implícitas, modelos mentales y cambio educativo. Citado en Pozo, J. & Gómez Crespo, M. (2000) Aprender y enseñar ciencia, España: Ediciones Morata.
 - Ruíz, A., Rosado, L. & Oliva, J. (1991) Investigación de los alumnos de enseñanza secundaria sobre la corriente eléctrica. Enseñanza de las ciencias, 9(2), 155-162.
 - Salvo D'Agostino. (2000) A History of the ideas of theoretical Physics. Países Bajos: Kluwer Academic Publishers.
 - Selman, R., Krupa, M., Stone, C. & Jaquette, D. (1982) Concrete operational thought of unseen force in children's theories of electromagnetism and gravity. Science Education, 66 (2), 181-194.
 - Sequeira, M. & Leite, L. (1991) Alternative conceptions and history of physics teacher education. Science Education, 75(1), 45-56.
 - Serouglou, F. & Koumaras, P. (2001) The contribution of the History of Physics in Physics Education: A review. En Bevilacqua, F. & Giannetto, E. (Eds.) The contribution of history and philosophy of science, (327-346) Netherlands: Kluwer Academic Publishers.

- Shepardson, D. & Pizzini, E. (1991) Questioning levels of junior high school science textbooks and their implications for learning textual information. Science Education, 75(6), 673-682.
- Shipstone, D. (1985) Electricity in Simple circuits. En Driver, R., Guesne, E. & Tiberghien, A. (Eds.) Children's ideas in science. (33-51) Milton Keynes, Open University Press.
- Shipstone, D. (1988) A study of students' understanding of electricity in five European countries. International Journal of Science Education, 10 (3), 303-316.
- Solis, R. (1984) Ideas intuitivas y aprendizaje de las ciencias. Enseñanza de las Ciencias, 83-89.
- Stauffer, R. (1957) Speculation and Experiment in the Background of Oersted's Discovery of Electromagnetism. En Brush, S. (Ed.), History of Physics. Selected Reprints, (pp. 78 – 95), Estados Unidos: American Association of Physics Teachers.
- Stinner, A. (1992). Science Textbooks and Science Teaching: From Logic to Evidence. Science Education, 76(1), 1-16.
- Stocklmayer, S. & Treagust, D. (1996) Images of electricity: how do novices and experts model electric current? International Journal of Science Education, 18(2), 163-178.
- Summers, M., Kruger, C. & Mant, J. (1998). Teaching electricity effectively in the primary school: a case study. International Journal of Science Education, 20(2), 153-172.
- Tytler, R. (1998) The nature of students' informal science conceptions. En Flores, F., López, A. & Gallegos, L. (2000) Análisis de las ideas previas y características de captura. Trabajo no publicado.
- a. Viennot, L. & Rainsong, S. (1992). Students' reasoning about the superposition of electric fields. International Journal of Science Education, 14, 475-487.
- b. Viennot, L. & Rainsong, S. (1999) Design and evaluation of a research-based teaching sequence: the superposition of electric field. International Journal of Science Education, 21(1), 1-16.
- Wandersee, J. (1985) Can the history of Science help science educators anticipate students' misconceptions? Journal of Research in Science Teaching, 23, 581-597.

- Wandersee, J., Mintzes, J. y Novak, J. (1994) Research in alternative conceptions in Science. En Flores, F., López, A. & Gallegos, L. (2000) Análisis de las ideas previas y características de captura. Trabajo no publicado.
- Whiteley, P. (1993) The history of Physics – its use in a Caribbean physics syllabus. Citado en Serouglou, F. & Koumaras, P. (2001) The contribution of the History of Physics in Physics Education: A review. En Bevilacqua, F. & Giannetto, E. (Eds.) The contribution of history and philosophy of science, (327-346) Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Whittaker, W. (1987) A history of the theories of aether and Electricity, Estados Unidos: Tomash Publishers.
- Wisner, M. & Carey, S. (1983) When heat and temperature were one. Citado en Serouglou, F. & Koumaras, P. (2001) The contribution of the History of Physics in Physics Education: A review. En Bevilacqua, F. & Giannetto, E. (Eds.) The contribution of history and philosophy of science, (327-346) Netherlands: Kluwer Academic Publishers.

Libros de texto analizados

- Alonso, M. & Finn, E. (1998) Física Campos y Ondas (vol. 2). México: Addison Wesley.
- Arons, A. (1970) Evolución de los conceptos de la Física, México: Editorial Trillas.
- Halliday, D., Resnick, R. & Krane, K. (1996) Física (vol. 2). México: Compañía Editorial Continental.
- Lorrain, P. & Corson, D. (1990) Electromagnetism: Principles and Applications, (2^a ed.), Estados Unidos: W. H. Freeman & Company.
- Olenick, R., Apostol, T. & Goodstein, D. (1986) Beyond the mechanical universe, Estados Unidos: Cambridge University Press.
- Purcell, E. (1985) Electricity & Magnetism, (2^a edición), Estados Unidos: McGraw Hill.
- Reitz, M., Milford, J. & Christy, R. (1996) Fundamentos de la teoría electromagnética, (4^a ed.) Estados Unidos: Addison-Wesley Iberoamericana.

- Riveros, H. (1998) Electricidad y Magnetismo. México: Editorial Trillas.
- Rogers, E. (1973) Physics for the inquiring mind, Estados Unidos: Princeton University Press.
- Vanderlinde, J. (1993) Classical Electromagnetic Theory. Estados Unidos: John Wiley & Sons.

Páginas web

1. <http://ideasprevias.cinstrum.unam.mx:2048>
2. <http://didactical.physics.helsinki.fi/kirjasto/ont/vk/thesis.pdf>

Anexo 1

Conceptos de campo eléctrico y magnético

A lo largo del recorrido histórico realizado en los capítulos 2, 3 y 4, se hizo un recuento de las concepciones de los científicos sobre el campo eléctrico, magnético y electromagnético.

Fue así que llegamos a la concepción de Einstein acerca del campo electromagnético: "**una entidad que existe de manera independiente y que posee energía y momento como la materia ponderable**". Es necesario hacer hincapié en que esto no se logra sólo con el estudio de la electrostática o magnetostática, sin embargo, es en estos temas en donde se comienza a formar la concepción; y son los principios de la electrostática y magnetostática, los que se establecieron en este anexo.

Siendo ésta la visión que se desea que los estudiantes tengan del campo electromagnético, deben primero establecerse las concepciones de campo eléctrico y campo magnético:

Campo eléctrico

Para llegar a la concepción de un campo eléctrico como una entidad que existe de manera independiente, hay que hacer algunas consideraciones:

a. Sabemos que la interacción entre cargas eléctricas en reposo se encuentra descrita por la **Ley de Coulomb**: la fuerza que ejercen dos cargas eléctricas en reposo entre sí, es proporcional al valor de sus cargas e inversamente proporcional al cuadrado de su distancia. De esta forma, la fuerza expresada en su forma vectorial es:

$$\vec{F}_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2 \hat{r}_{21}}{r_{21}^2} \quad \dots 1$$

De la ecuación anterior, es importante notar, que la fuerza que ejerce la carga uno sobre la dos, es igual pero en sentido contrario de la que ejerce la carga dos sobre la uno. Por otro lado, el vector unitario indica que la fuerza es paralela a la recta que une las cargas. Por lo que la dirección de la fuerza será la del vector unitario.

Otra característica de la interacción coulombiana, es que la fuerza entre dos cargas no se altera por la presencia de una tercera carga. Esto significa, que no importa qué tantas cargas se encuentren en un sistema, la ley de Coulomb (ec. 1) nos permite calcular la fuerza entre cada par de cargas.

Así, si se tiene un conjunto de cargas, la fuerza total ejercida sobre una de ellas, será la suma de las fuerzas que ejerce cada carga sobre ella por separado. Esto es la base del **principio de superposición**.

Por ejemplo, si se tienen tres cargas (q_1 , q_2 y q_3) y se quiere estimar la fuerza que ejercen las dos primeras sobre q_3 , la ecuación para calcularla, correspondería a:

$$F_3 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{q_3 q_1 r_{31}^{\wedge}}{r_{31}^2} + \frac{q_3 q_2 r_{32}^{\wedge}}{r_{32}^2} \right] \quad \dots 2$$

Además de la Ley de Coulomb, se puede calcular la **energía** de una distribución de cargas estacionaria. Esta energía corresponde al trabajo necesario para reunir las cargas en una configuración dada, y se le puede asignar debido a este tipo de sistemas son conservativos.

Consideremos dos cargas (q_1 y q_2) separadas a una distancia muy grande. Si acercamos q_1 a q_2 a una distancia r_{12} , el trabajo realizado es la integral de la fuerza por el desplazamiento en la dirección de la fuerza:

$$W = \int f \times d = \int_{r=\infty}^{r_{12}} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2 (-dr)}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_{12}} \quad \dots 3$$

El trabajo, es entonces positivo para cargas del mismo signo. El trabajo se expresa en joules siempre que la carga esté en coulombs y la distancia en metros.

Gracias a que la fuerza obedece el principio de superposición, el trabajo necesario para llevar una carga (q_1) hacia otras dos (q_2 y q_3), será la suma del trabajo necesario cuando solamente está q_2 y el necesario cuando solamente está presente q_3 .

Así, para reunir las tres cargas, el trabajo está dado por:

$$U = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{q_1q_2}{r_{12}} + \frac{q_1q_3}{r_{13}} + \frac{q_2q_3}{r_{23}} \right] \quad \dots 4$$

Dado que el sistema eléctrico es un sistema conservativo, el trabajo necesario para colocar las cargas en una configuración dada, se puede considerar como la **energía potencial eléctrica** de este sistema particular, y depende de la configuración del sistema -no se le asigna una parte de la energía a cada partícula-.

La referencia que se toma de energía potencial cero, corresponde a todas las cargas muy alejadas.

Ya que se ha visto la forma en que interactúan dos o más partículas en condiciones estacionarias, se puede generalizar la expresión para la fuerza que ejerce una distribución de N partículas sobre una carga q_0 :

$$\vec{F}_0 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{j=1}^N \frac{q_0q_j}{r_{0j}^2} \hat{r}_{0j} \quad \dots 5$$

La fuerza descrita, es proporcional a la carga q_0 , pero se define el campo eléctrico como la fuerza por unidad de carga; por lo que dividiendo la expresión 5 entre la carga q_0 , se tiene la ecuación del **campo eléctrico**, para una distribución de N cargas:

$$\vec{E}(x, y, z) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{j=1}^N \frac{q_j}{r_{0j}^2} \hat{r}_{0j} \quad \dots 6$$

La expresión anterior nos ayuda a predecir cómo será la fuerza que actuará sobre cualquier carga en un cada uno de los puntos del espacio que describe.

Hay que notar, que en la ecuación anterior se define al campo como una función vectorial que nos da la fuerza en módulo y dirección que una carga de prueba experimentará en cada punto. Las unidades del campo son Newton por Coulomb si la carga está en coulombs y la distancia en metros.

Es importante considerar, que a menos que la distribución de carga sea fija, la introducción de cualquier carga puede alterar la distribución original y por lo tanto cambiar el campo eléctrico.

Por lo tanto, la función $\vec{E}(x, y, z)$ caracteriza cada punto de un sistema, aún cuando no se sepa la configuración que originó el campo eléctrico.

b. Las líneas de fuerza son un elemento para **representar** la intensidad y dirección del

campo eléctrico. Así, aunque en los dibujos aparezcan las líneas separadas, no significa que en lugares donde no hay líneas de fuerza la intensidad del campo sea nula. Antes bien, la separación de las líneas de fuerza debe indicar la intensidad del campo, y la tangente en cada punto indicará la dirección del campo eléctrico. Las líneas de fuerza no indican por lo tanto el valor del campo.

Por lo tanto, las características que hay que tomar en cuenta de las líneas de fuerza, son:

- 1. Las líneas de fuerza dan la dirección del campo eléctrico en cualquier punto.
- 2. Las líneas de fuerza se originan en cargas positivas y terminan en cargas negativas.
- 3. Las líneas de fuerza se trazan de tal modo que el número de líneas por unidad de área de sección transversal sea proporcional a la magnitud del campo eléctrico.

Un ejemplo que nos ayudará a visualizar tanto el campo eléctrico como las líneas de fuerza, es el caso del dipolo eléctrico.

El dipolo eléctrico es una configuración que consta de una carga positiva y una carga negativa de igual magnitud q , separadas una distancia d . La figura siguiente, ilustra este arreglo de cargas con las líneas de fuerza, que salen de la carga positiva hacia la negativa.

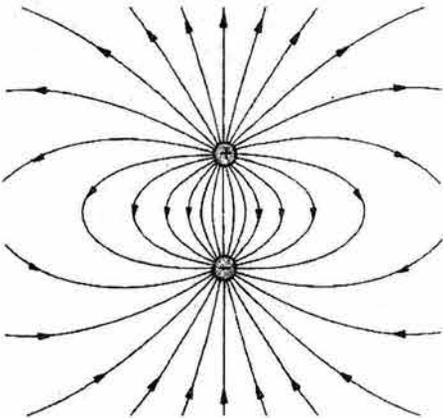


Fig. 1 Dipolo eléctrico

Ahora bien, lo que se quiere del dipolo, es encontrar la intensidad del campo eléctrico, en un punto P que se encuentra a una distancia x de la bisectriz perpendicular de la línea que une las dos cargas, como lo indica la siguiente figura:

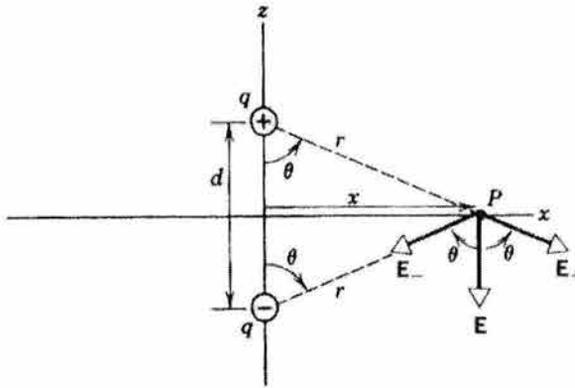


Fig. 2 Cálculo del campo eléctrico para un dipolo eléctrico

Las cargas positiva y negativa, establecen los campos eléctricos \mathbf{E}_+ y \mathbf{E}_- , respectivamente. La magnitud de los campos es la misma, puesto que P se encuentra a la misma distancia de ambas cargas. De acuerdo con el principio de superposición, el campo eléctrico en P, corresponde a la suma de los vectores:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_+ + \mathbf{E}_-$$

Así, la magnitud de los campos, de acuerdo con la ecuación 6, es:

$$\bar{E}_+ = \bar{E}_- = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{x^2 + (d/2)^2} \quad \dots 8$$

Debido a que los ángulos que forman ambos campos con respecto a la dirección z son iguales, entonces las componentes de ambos en la dirección x se anulan, y el campo total tiene solamente una componente en z:

$$E = E_+ \cos \theta + E_- \cos \theta = 2E_+ \cos \theta \quad \dots 9$$

$$\cos \theta = \frac{d/2}{\sqrt{x^2 + (d/2)^2}} \quad \dots 10$$

pero

Sustituyendo la ecuación 9 en la 8, se tiene que la magnitud del campo en P, es:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qd}{(x^2 + [d/2]^2)^{3/2}} \quad \dots 11$$

De aquí que el campo sea proporcional al producto de las cargas por la distancia que las

separa. Este producto, recibe el nombre de **momento dipolar eléctrico p** .

Para mayores distancias, el binomio $(x^2 + [d/2]^2)^{3/2}$ se desarrolla, obteniendo la expresión del campo eléctrico:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{p}{x^3} \quad \dots 12$$

Es importante resaltar que este campo es para puntos distantes en el plano medio del dipolo.

c. El campo eléctrico no depende de un medio para su existencia, pero sí afecta los distintos medios en los que se propaga. Esto es, el campo eléctrico interactúa con la materia, de tal forma que esta se polariza en presencia de un campo eléctrico.

Un ejemplo de lo anterior, es un **cuerpo conductor** colocado en el campo uniforme creado por unas placas paralelas, como en la figura:

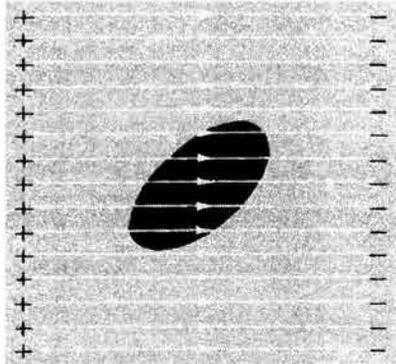


Fig. 3 Un cuerpo conductor en un campo eléctrico uniforme

En el tiempo en el que se introduce el cuerpo, el campo eléctrico es el mismo en el interior que en el exterior del cuerpo (en una primera aproximación). Cargas móviles se crean en el cuerpo. Así, los iones positivos son arrastrados por el campo en un sentido, y los negativos en sentido contrario, como lo indica la figura:

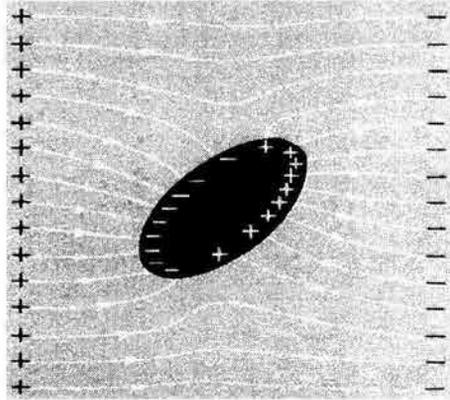


Fig. 4 Después de un tiempo las cargas del conductor se mueven hasta que el campo en el interior se anula.

Debido a que los iones no pueden moverse más allá de la superficie del cuerpo, se reúnen en la superficie anulando el campo original que había en el interior del objeto.

Otro caso, es cuando se introduce un cuerpo **no conductor** en un campo eléctrico. Un ejemplo es una placa de plástico colocada entre dos placas paralelas con cargas opuestas. Debido a que el material consta de partículas cargadas, el campo existente entre las dos placas paralelas actúa sobre estas. Así, si la placa superior se encuentra cargada positivamente, los electrones son atraídos hacia ella, mientras que las cargas positivas se mueven hacia el extremo contrario, como se muestra en la figura:

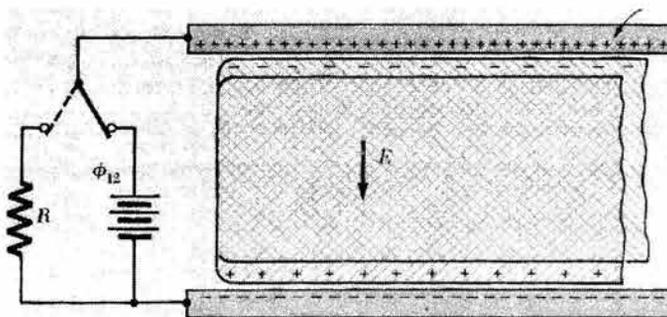


Fig. 5 Material no conductor colocado entre las placas de un condensador.

El interior del bloque permanece eléctricamente neutro, aunque en los extremos se puede

encontrar, por un lado, una capa de carga negativa en la parte superior y por el otro, una pequeña capa de carga positiva en el lado inferior.

Los materiales no conductores que se sitúan en un campo eléctrico, reciben el nombre de dieléctricos.

d. Un elemento de importancia dentro de la teoría electrostática, es la **diferencia de potencial**.

Esta diferencia de potencial es el trabajo por unidad de carga efectuado para mover una carga positiva desde un punto P_1 a un punto P_2 en el campo E , y se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$\phi_{21} = - \int_{r_1}^{r_2} E \cdot ds \quad \dots 13$$

El potencial es entonces una función escalar que depende de la posición, y no tiene dirección asociada a él. Es una función asociada con el campo E , y siempre que se tenga un campo electrostático, la función ϕ estará determinada. Es importante, no confundir la energía potencial de un sistema con el potencial ϕ ; mientras que la energía potencial eléctrica es el trabajo total requerido para unir las cargas en un arreglo determinado, el potencial eléctrico asociado con un campo, sería el trabajo por unidad de carga requerido para traer una carga de prueba positiva desde el infinito hasta un punto determinado en el campo eléctrico. Hay que notar que el potencial tiene un signo negativo, el cual corresponde a que el trabajo que se realiza, se hace en contra del campo eléctrico.

Dadas las características anteriores, podemos decir que el **campo eléctrico** es un elemento irreducible en la descripción de arreglos o cargas electrostáticas -que son los que se han tratado-, y que a la configuración de una distribución de cargas se le puede asociar una energía potencial eléctrica.

Aunado a lo anterior, hay que tomar en cuenta que el campo es una función vectorial, que para estar descrito completamente es necesario asignarle una dirección y una magnitud a cada punto del sistema que describe.

Campo magnético

Hay dos formas de presentar el campo magnético. La primera de ellas, es verlo como un campo que se extiende a partir de un imán, y la segunda como un campo producido por carga en movimiento. Para esto, hay que tomar en cuenta que el campo magnético visto como un campo que se extiende a partir de un imán, no dio muchos frutos en cuanto al desarrollo del concepto de campo magnético. Fue hasta que Oersted observó los efectos que causaba una corriente sobre un imán que tanto las propiedades como el concepto de campo magnético fueron tomando forma.

Al presentar el campo magnético como una propiedad de los imanes, deben tomarse en cuenta los siguientes aspectos:

a. Los imanes tienen dos polos: norte y sur. De esta forma la fuerza que ejercen los imanes entre sí puede ser atractiva o repulsiva. Dos polos iguales se repelen entre sí, mientras que dos polos distintos se atraen. Hay que resaltar que los polos son distintos de las cargas eléctricas.

b. Las **líneas de fuerza** del campo magnético de un imán son similares a las de un campo eléctrico en el sentido en que sólo nos sirven para **representar** geoméricamente la dirección e intensidad del campo magnético.

c. Al igual que el campo eléctrico, el campo magnético no depende de un medio para su propagación. Esto es, se puede propagar en cualquier medio; aunque los materiales se ven afectados en su estructura atómica por el campo magnético en menor o mayor grado, dependiendo del tipo de material.

Debido a la forma en que se comportan los materiales en presencia de un campo magnético, se les puede clasificar en:

- Diamagnéticos: aquellas que en presencia de un imán son repelidas ligeramente como el agua, cloruro sódico, etc. La mayoría de los compuestos inorgánicos y casi todos los orgánicos, son diamagnéticos.
- Paramagnéticos: aquellas que en presencia de un imán son atraídas hacia la región de campo más intenso, como el aluminio y sodio.
- Ferromagnéticos: aquellos materiales que se comportan como el hierro y la magnetita.

Ahora bien, debido a que no se pueden aislar los polos magnéticos de tal forma que se tenga una relación como la descrita por ecuación 1 de este anexo, los campos magnéticos que son descritos con mayor detalle por la mayoría de los textos, son los de una carga en movimiento o una corriente eléctrica.

Así, para introducir el campo magnético debido al movimiento de cargas, se pueden tomar en cuenta los siguientes elementos:

a. Considerar algunas experiencias puede ayudar a visualizar las fuerzas magnéticas. Ejemplos de ello son:

- Cuando se colocan dos hilos de forma paralela en los que hay una corriente eléctrica en el mismo sentido, experimentan una fuerza por unidad de longitud que es directamente proporcional al producto de las dos corrientes, e inversamente proporcional a la distancia entre los cables. Si las corrientes van en sentido contrario, la fuerza cambia y de ser atractiva, ahora es repulsiva.

Esta fuerza depende solamente de las cargas en movimiento, es decir de la corriente eléctrica. Esta fuerza, existente cuando hay cargas en movimiento, es llamada **fuerza magnética**.

- El experimento de Oersted, de colocar una brújula de forma perpendicular a un hilo por el que circula una corriente eléctrica, es otro ejemplo que da cuenta de las fuerzas magnéticas.

Las dos experiencias anteriores, ilustran interacciones debidas a cargas en movimiento; así, al igual que el campo eléctrico da cuenta de las interacciones eléctricas, el **campo magnético** da cuenta de las interacciones magnéticas o de cargas en movimiento.

Así, una corriente eléctrica tiene asociado un campo magnético, por lo que cualquier partícula cargada móvil que se encuentre en este campo, experimentará una fuerza proporcional al campo magnético:

$$\vec{F} = q\vec{E} + q(\vec{v} \times \vec{B}) \quad \dots 14$$

Donde **F** es la fuerza que experimentará la partícula cargada, **E** el campo eléctrico que actúa sobre la partícula cargada, **v** la velocidad a la que se desplaza y **B** el campo magnético. Si los campos varían con el tiempo, deben considerarse los valores instantáneos de fuerza, campo eléctrico, velocidad y campo magnético. Las unidades del campo magnético, serán entonces Ns/Cm que recibe el nombre de tesla (T).

Como se había mencionado, el campo magnético se relaciona con la corriente eléctrica. La ecuación que describe dicha relación, es:

$$\vec{B} = \hat{z} \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad \dots 15$$

Las unidades del campo magnético en la ecuación anterior, son Teslas, siempre que la corriente esté dada en amperes, r en metros y $\mu_0 = 1/\epsilon_0 c^2$.

Ahora bien, ya que se tiene la expresión del campo magnético debido a una corriente eléctrica, se puede calcular la fuerza que ejercen entre sí los hilos paralelos por los que circula corriente, y de los que se habló en una de las experiencias. El campo magnético debido a uno de los hilos, es:

$$B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi r} \quad \dots 16$$

Considerando que r es la distancia entre los hilos, I_1 e I_2 las corrientes que circulan por los cables 1 y 2 respectivamente. El campo debido a la corriente 1, afectará las cargas en movimiento del hilo dos. Así, dentro del segundo hilo, se tiene una corriente I_2 constituida por n_2 cargas en movimiento con una carga q_2 y velocidad v_2 por cada centímetro de longitud. De acuerdo con la ecuación 14, la fuerza sobre cada una de las cargas es $q_2 v_2 B_1$. Por lo tanto, la fuerza sobre cada centímetro de longitud de hilo es $I_2 B_1$:

$$F = \frac{\mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi r} \quad \dots 17$$

La fuerza sobre el hilo dos es igual pero de signo opuesto.

b. Es de notarse que la ecuación 15 muestra algunas de las características del campo magnético. En primer lugar, que el campo magnético es una magnitud vectorial –necesita una magnitud y dirección para quedar descrito completamente-. La intensidad del campo magnético varía linealmente con la distancia al hilo conductor.

En el caso del hilo conductor, las **líneas de campo magnético** son circunferencias que envuelven el hilo, de aquí que **B** no tenga componentes paralelas al hilo, sólo perpendiculares.

Aunado a lo anterior, podemos considerar la integral de una trayectoria cerrada alrededor de un hilo conductor. Debido a que la integral sobre cualquier camino cerrado en el campo magnético es nula, se puede decir que el campo magnético de una trayectoria cerrada, es proporcional a la corriente encerrada por el camino:

$$\int B \cdot ds = \mu_0 \times \text{corriente}$$

...18

La relación anterior es válida siempre que el camino elegido de una sola vuelta alrededor del hilo conductor de corriente. Si se dan más vueltas, la integral será proporcional al número de vueltas. La ecuación anterior para el campo magnético, se cumple para cualquier sistema de hilos conductores de corriente. Esto es, se cumple para el campo magnético total que es la suma vectorial de los campos magnéticos de los hilos que conforman el sistema.

El campo magnético de un hilo conductor, así como los circuitos eléctricos de corriente alterna, nos permiten describir otros aspectos del campo magnético, tal como la energía asociada al campo magnético. Aunque todos estos aspectos no serán tratados en este anexo, es importante reconocer, que el campo magnético no se explica completamente con la sola presentación del magnetismo como una propiedad de los imanes, antes bien, es necesario el estudio de los fenómenos de inducción para comprender de forma completa el campo magnético.

c. Como se vio en el inciso anterior, el campo magnético describe las interacciones entre partículas cargadas. Esto implica, que si se tiene una magnitud vectorial **B** se describe la fuerza sobre una partícula móvil. Esto hace que al igual que el campo eléctrico, sea una entidad independiente e irreducible en la descripción de interacciones entre partículas cargadas en movimiento.

Los aspectos del campo eléctrico y el magnético que se han tratado en este anexo, dan las bases para un estudio más amplio y detallado de ambos campos, y brindan al estudiante las principales características del campo eléctrico y magnético.

Anexo 2

Concepto de corriente eléctrica

La corriente eléctrica debe considerarse como el **movimiento de las cargas en un conductor**. Aunque aquí sólo trataremos corrientes estacionarias, y la corriente de desplazamiento, hay que considerar también otro tipo de corrientes.

Algunos puntos que hay que resaltar del movimiento de cargas en las **corrientes estacionarias** son:

- a. El movimiento de los electrones se debe a la existencia de una diferencia de potencial entre los extremos de un conductor.
- b. La diferencia de potencial establece un campo eléctrico, el cual ejerce una fuerza sobre las cargas del conductor.
- c. Aunque las cargas no se mueven de manera uniforme, presentan un desplazamiento neto hacia una dirección.
- d. Los portadores de carga pueden ser positivos o negativos.

A lo largo de la siguiente descripción de la corriente retomaremos los puntos anteriores, de tal forma que se vea cómo quedan incluidos al describir la corriente eléctrica.

- En primer lugar, es necesario considerar una **densidad de corriente**, como una forma general de tratar portadores de carga que se mueven en un volumen tridimensional.

Para determinar la densidad de corriente, consideramos primero un medio en donde hay n partículas por unidad de volumen, que se mueven con una velocidad \mathbf{v} , y tienen todas la misma carga q . Tomamos un cuadrado de área a con cierta orientación con respecto al movimiento de las partículas, y vemos cuántas partículas atraviesan el área a en un intervalo de tiempo Δt .

Las partículas que atravesarán el cuadrado, serán aquellas que se encuentren contenidas en un prisma de longitud $u\Delta t$ y base el área del cuadrado:

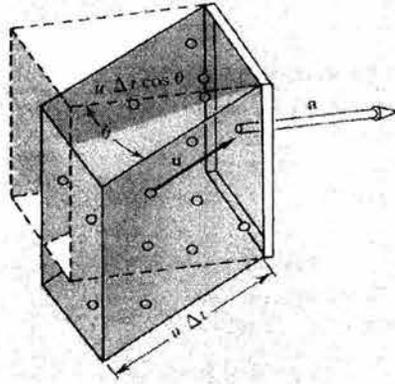


Fig. 6 Partículas que atraviesan un área por unidad de tiempo

El volumen del prisma es base \times altura, es decir, $au\Delta t \cos\theta$. Por lo tanto, el número de partículas que atraviesan el área en el intervalo de tiempo señalado, corresponde a la corriente a través del segmento de área por intervalo de tiempo:

$$I(a) = \frac{q(\bar{n}a \cdot \bar{u}\Delta t)}{\Delta t} = nqa \cdot \bar{u} \quad \dots 1$$

Para generalizar la ecuación anterior, podemos considerar distintos grupos de partículas, cada uno contribuyendo a la corriente total. Cada grupo está formado por un tipo determinado de partículas con una cierta velocidad, carga y cierto número de partículas. La corriente debido a estos grupos de partículas está dada por:

$$I(a) = n_1q_1\bar{a} \cdot \bar{u}_1 + n_2q_2\bar{a} \cdot \bar{u}_2 + \dots = \bar{a} \cdot \sum_k n_k q_k \bar{u}_k \quad \dots 2$$

De la ecuación anterior, llamamos a la sumatoria **densidad de corriente J**. Sus unidades son A/m^2 .

- El tipo de corriente eléctrica más común, o al menos con el que la mayoría de los estudiantes están familiarizados, es la **corriente estacionaria**. En este tipo de corriente el vector densidad de corriente es constante en el tiempo en todo punto, y se conserva la carga. Si se considera una región del espacio, rodeada por una superficie cerrada S, la integral de J sobre S, nos da la velocidad con la que la carga sale del volumen cerrado. Si la carga continúa saliendo indefinidamente, la carga se agotaría en cierto tiempo. Por lo tanto, si la distribución no depende del tiempo, la integral de superficie del vector **J** sobre cualquier superficie cerrada, debe ser cero. Lo anterior es equivalente a decir que:

$$\text{div} \bar{J} = 0 \quad \dots 3$$

Si no fuera así, la velocidad con la que sale la carga, correspondería a la variación de la carga en el volumen con respecto al tiempo:

$$\int_S \bar{J} \cdot d\mathbf{a} = -\frac{d}{dt} \int_V \rho dv \quad \dots 4$$

- Hay varias formas de mover las cargas, pero la que nos interesa por el momento es el **movimiento** debido a la **fuerza** ejercida por un **campo eléctrico**. Un campo eléctrico mueve a los portadores de carga positiva en sentido opuesto a los de carga negativa. Este movimiento corresponde a una corriente eléctrica en el sentido del campo eléctrico. En una gran cantidad de sustancias y materiales, la densidad de corriente es proporcional a la intensidad de campo eléctrico:

$$\bar{J} = \sigma \bar{E} \quad \dots 5$$

Donde σ es la conductividad del material. Su valor es grande para conductores metálicos y pequeño para aisladores. Este valor depende de otros factores tales como la temperatura del material.

De la relación anterior, se deduce la Ley de Ohm:

$$V = RI \quad \dots 6$$

La relación de proporcionalidad entre la corriente y el voltaje, proviene de la proporcionalidad entre la densidad de corriente y el campo eléctrico. Esto se debe a que I es la integral de J extendida a la sección recta del conductor, y V es la integral de línea del campo eléctrico a lo largo del conductor de un extremo al otro.

La resistencia R depende de la forma y tamaño del conductor y de la conductividad del material.

- Debido a la necesidad de que los portadores de carga se encuentren en el material antes de aplicar el campo eléctrico, la conductividad puede enfocarse en dos cuestiones. La primera es la cantidad de portadores de carga presentes en el material y su comportamiento en un campo eléctrico.

Enfocándonos a la conducción en metales, podemos considerar que los electrones libres o electrones de conducción son los que se mueven a través de la red formada por los átomos del metal. Una vez que se aplica un campo eléctrico a un metal, los electrones libres sienten una fuerza eE , que corresponde a la fuerza ejercida por el campo eléctrico aplicado. Debido a esta

fuerza los electrones tienen una cantidad de movimiento, la cual se incrementa con el tiempo. Durante su desplazamiento, colisionan con otros electrones o con los átomos del metal. Así, la movilidad de los electrones en este caso, depende del intervalo de tiempo en el que puede acumular cantidad de movimiento en una dirección, debido al campo eléctrico.

- El estudio de los circuitos eléctricos es un elemento indispensable dentro del estudio de la corriente eléctrica. De lo que sucede en un circuito podemos destacar lo siguiente:

- a. La carga en un circuito se conserva. Esto quedó expresado en la ecuación 3.
- b. La corriente a través de una resistencia disipa energía. La disipación de energía debida a una corriente eléctrica en una resistencia, se manifiesta principalmente en forma de calor. Esto se debe a que durante el movimiento, los iones adquieren energía cinética adicional al igual que cantidad de movimiento. Una o varias colisiones, devuelven la dirección de su cantidad de movimiento al azar, pero no necesariamente disminuyen la energía cinética del ión. Para que el ión tenga la cantidad de energía cinética que tenía al principio de su movimiento, es necesario que parte de su energía sea transferida a la partícula con la cual colisionó. De esta forma la energía en movimiento de los iones se convierte en energía cinética al azar de la red; esto es, calor. Al pasar entonces por un elemento de circuito, una carga pierde energía potencial de acuerdo con la ecuación:

$$dU = dqdV_{ab} = idtV_{ab} \quad \dots 7$$

Así, la cantidad de energía transferida a dicho elemento, está dado por:

$$P = \frac{dU}{dt} = iV_{ab} \quad \dots 8$$

- Un último elemento que hay que tomar en cuenta en la corriente continua, es la batería. En la batería, la energía química es la que hace que los portadores de carga se desplacen en una región en donde el campo eléctrico se opone a su movimiento.

Las baterías están formadas por dos electrodos inmersos en un electrolito. Al conectar las terminales de la batería a un circuito externo, los electrones circulan hacia dentro de la terminal positiva, y otros hacia fuera de la terminal negativa. En cada electrodo se llevan a cabo reacciones químicas en las que interviene el electrolito. Dentro de la batería hay un movimiento neto de iones positivos hacia la terminal positiva.

Como se había mencionado al principio, no sólo la corriente estacionaria es el único tipo de corriente, también está la **corriente de desplazamiento** —entre otras—.

La corriente de desplazamiento corresponde a una variación del campo eléctrico, la cual da lugar a un campo magnético. Así, siempre que hay un campo eléctrico variable, se encuentran presentes al mismo tiempo corrientes de conducción, cargas en movimiento. Esto principalmente ocurre en un circuito eléctrico donde uno de sus elementos es un condensador. Una vez que las placas del condensador se encuentran cargadas, se conectan a través de una resistencia. Por esta razón, las placas comienzan a descargarse, y el campo eléctrico que había entre ellas, cambia.

Si se midiera el campo magnético alrededor de todo el circuito, se tendría que cerca de las placas, el campo magnético es el que se esperaría producido por las corrientes de conducción.

Dadas las características anteriores se observa que el campo eléctrico variable, da lugar a un campo magnético, y entonces se define a la corriente de desplazamiento como:

$$\overline{J}_d = \epsilon_0 \frac{\partial \overline{E}}{\partial t} \quad \dots 9$$

Este término hace que el campo eléctrico y la corriente eléctrica sean compatibles con la ecuación de continuidad, considerando corrientes de conducción variables con el tiempo.