

**MODELACIÓN DEL CONCEPTO DE CAMPO ELECTROMAGNÉTICO:  
CARACTERIZACIÓN DEL RAZONAMIENTO SEGUIDO POR MAXWELL.**

Juan David Blanco

Isabel Garzón Barragán  
Docente Departamento de Física  
Universidad Pedagógica Nacional  
Directora de la Monografía

Tufik Zambrano  
Docente Departamento de Física  
Universidad Pedagógica Nacional  
Director de la Monografía

Universidad Pedagógica Nacional  
Facultad de Ciencia y Tecnología  
Departamento de Física

Línea de profundización: Enseñanza de las ciencias desde una perspectiva cultural

Bogotá D.C. 2013

**FORMATO****RESUMEN ANALÍTICO EN EDUCACIÓN - RAE**

Código: FOR020GIB

Versión: 01

Fecha de Aprobación: 10-10-2012

Página 1 de 4

**1. Información General**

<b>Tipo de documento</b>	Tesis de Grado
<b>Acceso al documento</b>	Universidad Pedagógica Nacional. Biblioteca Central
<b>Título del documento</b>	Modelación del concepto de campo electromagnético: Caracterización del razonamiento seguido por Maxwell.
<b>Autor(es)</b>	Blanco, Juan David
<b>Director</b>	Garzón, Isabel & Zambrano, Tufik.
<b>Publicación</b>	Bogotá, 2013, 32 p
<b>Unidad Patrocinante</b>	Universidad Pedagógica Nacional.
<b>Palabras Claves</b>	Campo electromagnético, concepto, conceptualización, modelación.

**2. Descripción**

Monografía que muestra una alternativa para conceptualizar sobre la noción de campo electromagnético, de acuerdo con los desarrollos de Maxwell. La conceptualización se realiza desde el análisis del proceso de creación y adaptación del modelo mecánico que Maxwell diseñó para la génesis y construcción de su teoría del campo electromagnético. El análisis de dicho proceso de modelación inicia desde el reconocimiento del contexto socio-cultural y cognitivo en el que estaba inmerso Maxwell, y desde el reconocimiento de los recursos conceptuales y analíticos que permitieron el desarrollo del modelo mecánico. Tal reconocimiento es fruto de considerar que las creaciones conceptuales surgen como producto de una situación problemática y que su conceptualización está constreñida, condicionada y limitada por todo el contexto socio-cultural y cognitivo de donde surgen o nacen. Por lo tanto, este caminar hace visible el proceso de gestación y desarrollo que tuvo el concepto de campo electromagnético en Maxwell, robusteciendo así la conceptualización que se puede elaborar al respecto.



## FORMATO

### RESUMEN ANALÍTICO EN EDUCACIÓN - RAE

Código: FOR020GIB

Versión: 01

Fecha de Aprobación: 10-10-2012

Página 2 de 4

### 3. Fuentes

Agazzi, E. (1978). *Temas y problemas de Filosofía de la Física*. Barcelona: Editorial Herder.

Berkson, W. (1981). *Las teorías de los campos de fuerza: Desde Faraday hasta Einstein*. Madrid: Alianza Editorial.

Duit, R. (2007). Science Education Research Internationally: Conceptions, research methods, Domains of Research. *Eurasia Journal of Mathematics Science & Technology Educations*, 3(1), 3-15.

Hewitt, P. (2007). *Física conceptual*. Pearson, Addison Wesley.

Llancaqueo, A., Caballero, M. C., & Moreira, M. A. (2003). El concepto de campo en el aprendizaje de la física y en la investigación en educación en ciencias. *Revista electrónica de enseñanza de las ciencias*, 2 (3), 227-253.

Maxwell, J. C. (1855-1856). On Faraday's lines of force. En *Scientific Papers* 1, 155-229, ed. W. D. Niven. Cambridge: Cambridge University Press.

Maxwell, J. C. (1861-1862). On physical lines of force. En *Scientific Papers* 1, 451-513, ed. W. D. Niven. Cambridge: Cambridge University Press.

Maxwell, J. C. (1864). A dynamical theory of the electromagnetic field. En *Scientific Papers* 1, 526-597, ed. W. D. Niven. Cambridge: Cambridge University Press.

Moreira, M. A. (2002). Vergnaud's conceptual fields theory, science education, and research in this area. *Investigações em Ensino de Ciências*, 7(1), 7-29.

Nersessian, N. J. (1992). "How do Scientist think? Capturing the dynamics of conceptual change in science." En *Minnesota Studies in the Philosophy of Science*. ed. R. Giere. Minneapolis: University of Minnesota Press.

Nersessian, N. (2008). *Creating scientific concepts*. Cambridge, Massachusetts: The MIT press.

Pocoví, M. C., & Hoyos, E. (2004). Estudio de caso de la comprensión de diferencia de potencial y FEM en alumnos avanzados y graduados en física. *Investigações em Ensino de Ciências*, 9 (3), 337-348.

Tipler, P. A. (1976). Física Conceptual. Editorial Reverté.

UNESCO. (2005). ¿Cómo promover el interés por la cultura científica? Una propuesta didáctica fundamentada para la educación científica de jóvenes de 15 a 18 años. *Publicado por la Oficina Regional de Educación de la UNESCO para América Latina y el Caribe.*

Velazco, S., & Salinas, J. (2001). Comprensión de los conceptos de campo, energía y potencial eléctricos y magnéticos en estudiantes universitarios. *Revista Brasileira de Ensino de Ciências*, 23(3), 308-318.

Vergnaud, G. (1990). La teoría de los campos conceptuales. En *Recherches en Didactique des Mathématiques*, 10(2-3), 133-170.

White, R. y Gunstone, R. (1992). *Probing Understanding*. USA: The Falmer Press.

#### 4. Contenidos

En los procesos de enseñanza/aprendizaje de la física existen diferentes dificultades, se considera que una de las dificultades más álgidas radica en la estéril comprensión de los conceptos físicos de acuerdo con los modelos científicos aceptados. Aquí se plantea como hipótesis que la razón por la cual existe una esterilidad en la comprensión conceptual por parte de los estudiantes se debe al modo como son tratados y enseñados los conceptos mediante la acción educativa.

Esta monografía parte del reconocimiento que los conceptos físicos son elementos claves para la comprensión de esta disciplina. Ellos son ese medio heurístico por el cual queremos informar y comunicar lo que interpretamos de procesos o fenómenos físicos, es decir, que los conceptos son un lenguaje, pero su análisis va más allá de un tratamiento lingüístico, por esta razón, pensamos que se deben abordar desde el reconocimiento de su dinámica de gestación y desarrollo, desde el análisis del cómo se construye el concepto, por qué se construye, cómo se moldea y adapta en la teoría teniendo en cuenta el contexto socio-cultural de donde surge.

Con base en esto, consideramos pertinente e importante estudiar estos aspectos porque nos ofrece una manera de reconocer, recoger y compilar más elementos que permiten la elaboración de mejores conceptualizaciones, con esto queremos decir, que realizar este tipo de trabajos le deben servir a los docentes para elaborar y comunicar mejores representaciones, más fieles y auténticas a las representaciones originales que contienen los conceptos. Es así como esta monografía analiza la práctica de creación de Maxwell, a propósito de *la construcción del mecanismo que construyó y guió la conceptualización de la noción de campo electromagnético*, es decir, nos proponemos conceptualizar sobre la noción de Campo Electromagnético que Maxwell elaboró desde el análisis y caracterización del modelo mecánico que él desarrolló.

## 5. Metodología

Se analiza y comprende el papel que juegan los conceptos para el entendimiento de la física con base en la teoría de los Campos Conceptuales de Gerard Vergnaud. Se utiliza esta teoría como parte del marco teórico para fundamentar y presentar el significado y la implicación que tiene la conceptualización en los procesos de aprendizaje. Así mismo, también se utiliza esta teoría para resaltar la importancia que tiene realizar trabajos de investigación en enseñanza/aprendizaje de la física sobre la base de la conceptualización de las nociones físicas. Luego se caracteriza y describe el Método Histórico-Cognitivo como herramienta para analizar el proceso de razonamiento seguido para crear conceptos científicos. Después se echa mano de ese método para reconocer y describir el contexto socio-cultural y cognitivo, y así mismo, para reconocer y describir los recursos conceptuales y analíticos de la situación problemática de Maxwell. El concepto y la conceptualización de campo electromagnético que Maxwell desarrolló se derivan de su contexto socio-cultural y cognitivo, y de su situación problemática. También, se utiliza el método histórico-cognitivo para analizar y describir los modelos que subyacen al concepto de campo electromagnético. Por último, se describen las magnitudes que definen al campo electromagnético a partir del modelo mecánico.

## 6. Conclusiones

Esta monografía presenta una conceptualización cualitativa sobre el concepto de campo electromagnético que Maxwell desarrolló. Esta conceptualización lleva a comprender la dinámica de la fenomenología, cómo se modela y explica esa fenomenología, cuáles son las variables que describen el campo electromagnético y pone las bases para comprender cómo se describe matemáticamente éste campo.

Con base en esto y de acuerdo con el marco teórico que se tomó como escenario se comprende que conceptualizar no significa poseer un conocimiento absoluto y pleno sobre un concepto u objeto de estudio; Conceptualizar y comprender un concepto implica un proceso multilíneal que se enriquece desde diferentes posiciones, escenarios, situaciones, contextos y demás, y que siempre puede estar siendo enriquecido. De este modo, se muestra que la comprensión se presenta en diferentes grados, sin que ello signifique que haya una conceptualización más completa o mejor que otra.

**Elaborado por:** Blanco, Juan David.

**Revisado por:** Isabel Garzón y Tufik Zambrano.

**Fecha de elaboración del  
Resumen:**

14

Mayo

2013

## TABLA DE CONTENIDO

I. INTRODUCCIÓN	
II. ¿CUÁL ES LA PROBLEMÁTICA QUE SE ABORDA?.....	1
III. ANTECEDENTES .....	5
IV. OBJETIVOS .....	5
a. Objetivo general .....	5
b. Objetivos específicos .....	5
1. FUNDAMENTOS SOBRE LA CONCEPTUALIZACIÓN .....	6
1.1. ¿Por qué hablar de conceptos físicos?.....	6
1.2. El método histórico-cognitivo .....	10
2. COMPRENSIÓN DE LA REPRESENTACIÓN DEL CONCEPTO DE CAMPO ELECTROMAGNÉTICO DE MAXWELL.....	14
2.1. Contextualización histórica .....	14
2.1.1. La cosmovisión antes de Maxwell .....	16
2.1.2. Situación problemática de Maxwell .....	18
2.2. Modelo mecánico de Maxwell que subyace a la noción de Campo EM que él propuso .....	20
2.2.1. Las Líneas de Fuerza .....	20
2.2.2. Relación entre la corriente eléctrica y el magnetismo.....	22
2.2.3. Definición de las Magnitudes Electromagnéticas a partir del Mecanismo de Maxwell ..	25
2.2.4. Consideraciones finales sobre el mecanismo y su funcionamiento.....	26
3. ANÁLISIS SOBRE LA CONCEPTUALIZACIÓN .....	30
4. REFERENCIAS.....	32

## I. INTRODUCCIÓN

Un componente esencial para el entendimiento de las teorías físicas son los conceptos, ellos son producto de la racionalización y su significado físico está relacionado con entes físicos. Sin embargo, comprender el significado de los conceptos no es nada trivial, es uno de los problemas fundamentales de los procesos de enseñanza/aprendizaje de la física. Una comprensión más precisa de los conceptos físicos sería plausible si nos apoyamos del conocimiento de los *procesos de creación*, del análisis del cómo se construye el concepto, por qué se construye, cómo se moldea y adapta en la teoría teniendo en cuenta el contexto socio-cultural de donde surge; todo esto permite dimensionar de forma más precisa el significado de los conceptos.

Por otro lado, analizar los *procesos de creación* de los científicos, despoja del carácter absolutamente objetivo a sus productos (teorías y conceptos) porque se encuentra que la estructura y diseño de estos no son independientes de los creadores, ni de los contextos socio-culturales. Por ejemplo, sujetos que pertenecen a las mismas comunidades no tienen el mismo éxito con sus investigaciones, esto quiere decir, que de alguna forma la práctica del científico está condicionada lo cual influye en su creación (teorías, conceptos, etc.).

Una alternativa para analizar los *procesos de creación* científica la brinda el Método Histórico-Cognitivo de Nancy Nersessian, el cual expone que la *innovación conceptual* surge de intentos por resolver problemas específicos haciendo uso de recursos conceptuales, analíticos y materiales proporcionados por el contexto cognitivo, social y cultural en el que son creados (Nersessian, 2008). El Método Histórico-Cognitivo le brinda herramientas de carácter epistemológico al docente; contemplar este carácter supone conocer de forma más perspicaz la naturaleza y desarrollo de las teorías, es decir, disponer de más elementos en la enseñanza para propiciar mejores conceptualizaciones y así mismo, para propiciar mejores escenarios de aprendizaje.

Por su parte, las investigaciones en didáctica de las ciencias muestran la necesidad de enriquecer y abordar la enseñanza de las ciencias haciendo uso de otras disciplinas como lo son: la filosofía de las ciencias, historia de las ciencias, pedagogía, psicología, lingüística, etc. para propiciar un mejor entendimiento de las ciencias (Duit 2007). Por lo tanto, si el docente tiene una formación integral: 1) logra estructurar mejor las teorías de su disciplina, 2) su enseñanza se ve enriquecida por el

cuerpo de conocimientos del que dispone y esto favorece una mejor organización de las actividades en el aula.

Es necesario hacer notar que conocer los *procesos de creación* científica suministrados por la historia de las ciencias, además de contextualizarnos en dichos procesos, también nos aporta estrategias para abordar las representaciones científicas teniendo en cuenta su construcción y evolución (Nersessian, 1992). En esta monografía se propone analizar la práctica de creación de Maxwell, a propósito de la teoría electromagnética de campos.

El desarrollo de la discusión se inicia con la presentación de algunos aspectos de la Teoría de Campos Conceptuales para continuar con la documentación sobre el Método Histórico-Cognitivo y así estar en disposición para identificar y describir qué elementos de tipo histórico (sociales, culturales, etc.) condicionan o influyen en los procesos de razonamiento para crear conceptos científicos, de igual forma qué elementos cognitivos condicionan o pueden servir de herramienta para el desarrollo de dichos procesos de razonamiento.

Así mismo, para identificar los modelos usados por Maxwell para crear la representación matemática del concepto de campo electromagnético y de acuerdo al método histórico-cognitivo, se realiza un análisis de la información recopilada de la obra de Maxwell (artículos), así como también, se realiza un estudio histórico para analizar su práctica investigativa teniendo en cuenta que ella es una expresión del razonamiento. De acuerdo con Nersessian (2008): “los practicantes del método histórico-cognitivo buscan interpretar las prácticas investigativas a la luz del actual entendimiento científico de qué y cómo las capacidades y limitaciones cognitivas humanas pudieron subyacer, facilitar y forzar tales prácticas”.



## II. ¿CUÁL ES LA PROBLEMÁTICA QUE SE ABORDA?

La educación en la escuela tiene como objeto, en primer lugar, formar individuos íntegros con la capacidad de reconocer que cada sujeto con el que convive tiene una visión de mundo particular que debe respetar, tolerar y enriquecer, y así, desde ese reconocimiento construir una sociedad justa, igualitaria y equitativa. En segundo lugar, brindar la formación mínima necesaria que requiere cada individuo para que pueda desempeñarse dentro de la sociedad y con su conocimiento pueda contribuir al desarrollo de esta. Por último, transformar el pensamiento y ampliar la realidad del individuo, es decir, más allá de enseñar y formar para generar algún grado de conocimiento, inteligibilidad, dominio o uso de los contenidos presentados en las diferentes asignaturas que se brindan en la escuela, dicho *proceso de aprendizaje*<sup>1</sup> supone y pretende expandir el pensamiento y el razonamiento del *individuo*; esto supone generar la capacidad de dimensionar las diferentes perspectivas que se pueden tener de una realidad, lo cual le permite tener una visión de mundo mucho más extensa, más contemplativa, más analítica, más propositiva y más metódica. Es en éste sentido en que, mediante la acción educativa, se transforma el pensamiento y la realidad del individuo, lo cual también enriquece la relación sujeto-sociedad y entra en resonancia con el primer objetivo mencionado.

De acuerdo con lo anterior, resulta imperativo tomar conciencia de la importancia de la labor que el docente desarrolla dentro de la sociedad y de la responsabilidad con que debe asumirla. Es necesario, además que el docente reflexione sobre la función que está desempeñando y se cuestione sobre qué tanto contribuye al cumplimiento de los objetivos de la escuela. Para nuestro caso particular como docentes en Física podemos responder a los objetivos de la escuela generando comprensión de ella (por supuesto, saber de Física no hace que la persona sea íntegra, pero sí puede transformar su pensamiento y realidad). Entonces cabe preguntarse sí ¿los docentes estamos generando comprensión de la Física? Considerando las variadas dificultades que se presentan en la enseñanza/aprendizaje de la Física, podríamos contestar que la comprensión que se propicia de ella es bastante deficiente.

---

<sup>1</sup> Con *proceso de aprendizaje* nos queremos referir al “*entrenamiento*” que puede realizar cada asignatura con nuestro pensamiento. Es decir, supongamos que cada una de las asignaturas que se brindan en la escuela representa un deporte. Como sabemos cada deporte ejercita ciertos músculos del cuerpo, pero no todos, sólo los que necesita fortalecer para que le permitan al cuerpo un desempeño potencializado durante la competencia. Así mismo, cada asignatura ejercita nuestro pensamiento y lo fortalece de una manera particular, cada asignatura enseña una forma de proceder, de razonar, o complementa a otras formas. Cada asignatura enseña una visión de mundo parcial, pero que hace parte de una visión global.

Una de las dificultades más álgidas durante el proceso de enseñanza/aprendizaje de esta ciencia radica en la estéril comprensión de los conceptos físicos, de acuerdo con los modelos científicos aceptados. Diferentes investigadores han desarrollado sus trabajos de investigación en Enseñanza/Aprendizaje de la Física con base en la dificultad de la *comprensión conceptual* que presentan los estudiantes en diferentes temáticas de la misma (Velazco & Salinas, 2001; Pocoví & Hoyos, 2004; Llancaqueo, Caballero, & Moreira, 2003). Por otro lado, cuando se interpela sobre ¿qué estudia la física? sabemos que ella estudia el comportamiento del mundo físico. Tipler afirma (1976) “La física estudia las reglas de la naturaleza y nos permite comprender mejor nuestro mundo físico”. Paul Hewitt (2007) nos da otra idea al respecto:

*“La ciencia es el cuerpo de conocimientos que describe el orden dentro de la naturaleza y las causas de ese orden. En segundo lugar, la ciencia es una actividad humana continua que representa los esfuerzos, los hallazgos y la sabiduría colectivos de la raza humana, es decir, se trata de una actividad dedicada a reunir conocimientos acerca del mundo, y a organizarlos y condensarlos en leyes y teorías demostrables.”* (2007).

Entonces, la Física estudia el comportamiento y los procesos de los fenómenos físicos que ocurren en la naturaleza. Además estudia sus diferentes características y propiedades. Como producto de éste estudio, la Física logra representar y modelar diferentes grupos de fenómenos con todas sus propiedades a través de leyes y teorías.

La acepción que se tendrá de *teoría* será la desarrollada por Agazzi (1978): “Una teoría es un lenguaje que se refiere a un cierto universo de objetos”. Por lenguaje se entenderá todo el conocimiento que se tiene de algún objeto de estudio y que se pretende *comunicar de una manera particular*. Por universo de objetos, él se refiere no sólo a un conjunto de elementos, sino a éste conjunto provisto también de todas las propiedades y relaciones definibles sobre sus elementos. Esto quiere decir, que una teoría es la consolidación del conocimiento que se tiene de algún universo de objetos, éste conocimiento que se supone es legítimo, se da a conocer, pero la manera en la que se da a conocer es propia del *investigador*, lo cual significa que está sujeta a las “*acepciones y concepciones*” que él construye.

De acuerdo con lo que dice Agazzi acerca de lo que es una teoría hay dos ideas implícitas trascendentales, la primera idea invita a pensar en que si se pretende realizar un análisis al lenguaje de una teoría dicho análisis no debe ser, precisamente, lingüístico (por análisis lingüístico nos referimos al análisis del significado de las proposiciones y la relación entre estas). Por el contrario debe ser *dinámico*, esto quiere decir, que dicho análisis se debe enfocar en analizar el proceso de creación y de desarrollo del conocimiento que contiene la teoría y en la manera en que se comunica. Se entenderá que debe ser dinámico el análisis sí se reconoce que una teoría no es producto de la formulación de un conocimiento gestado meramente por razonamientos lógicos, sino que es producto también de un conocimiento gestado por *constreñimientos*.

La segunda idea evidencia una íntima relación entre dos hechos mencionados anteriormente. En un primer punto se dijo que una de las problemáticas más álgidas en la enseñanza/aprendizaje de la física radica en la estéril *comprensión de los conceptos*. En seguida de este punto analizamos qué estudia la física, y se concluía teniendo en cuenta lo expuesto de Agazzi: que la manera en la que se da a conocer una teoría está sujeta a las *concepciones y acepciones* del investigador. Como se puede ver existe una íntima relación entre estos dos hechos ya que ambos convergen en la distinción de la *conceptualización*.

Entonces se reconoce que a la base de las teorías existe un elemento necesario para su construcción y representación, éste elemento es *el concepto*. Sin embargo, aunque ya se reconozca que los conceptos juegan un papel importante en la estructura de las teorías físicas y en la comprensión de las mismas, resulta necesario responder ¿por qué ha sido éste elemento una dificultad? Es decir, por qué ha sido una dificultad la comprensión conceptual. Éste trabajo plantea como hipótesis que la dificultad radica en el modo como son tratados y enseñados los conceptos.

Al estudiar y analizar libros de enseñanza de las ciencias, se encuentra que los conceptos son tratados como productos terminados, lo cual no permite que se logre dimensionar, a veces ni siquiera en mínima extensión la representación que contienen. De acuerdo con la UNESCO, los docentes mediante su acción educativa generan diferentes visiones deformadas de lo qué son las ciencias, una de ellas se conoce como *visión aproblemática y ahistórica*. Hemos tomado un pequeño párrafo para ilustrar con mayor claridad tal situación y para fundamentar la hipótesis que aquí se ha planteado:

Al presentar unos conocimientos ya elaborados, sin siquiera referirse a los problemas que están a su origen se pierde de vista que, como afirma Bachelard (1938), “todo conocimiento es la respuesta a una cuestión”, a un problema. Este olvido dificulta captar la racionalidad del proceso científico y hace que los conocimientos aparezcan como construcciones arbitrarias. (2005, p. 39-40).

Es importante reconocer que lo imperativo de los conceptos en el marco de la enseñanza está en la conceptualización o comprensión de la representación que ellos contienen, porque en la comprensión de ella es que el individuo logra entender y organizar el comportamiento del mundo físico. Por lo tanto, es importante trabajar y mostrar que los conceptos no son productos terminados, sino que ellos conllevan todo un proceso de creación y construcción, quizás así se podrá “*conceptualizar el concepto*”, comprender en mejor medida la extensión del concepto, la representación que contienen y su significado.

Esta monografía parte del reconocimiento que los conceptos físicos son elementos claves para la comprensión de esta disciplina. Ellos son ese medio heurístico por el cual queremos informar y comunicar lo que interpretamos de procesos o fenómenos físicos, es decir, que los conceptos son un lenguaje, pero su análisis va más allá de un tratamiento lingüístico, por esta razón, pensamos que se deben abordar desde el reconocimiento de su dinámica de gestación y desarrollo, desde el análisis del cómo se construye el concepto, por qué se construye, cómo se moldea y adapta en la teoría teniendo en cuenta el contexto socio-cultural de donde surge.

Con base en esto, consideramos pertinente e importante estudiar estos aspectos porque nos ofrece una manera de reconocer, recoger y compilar más elementos que permiten la elaboración de mejores conceptualizaciones, con esto queremos decir, que realizar este tipo de trabajos le debe servir a los docentes para elaborar y comunicar mejores representaciones, más fieles y auténticas a las representaciones originales que contienen los conceptos. Es así como esta monografía analiza la práctica de creación de Maxwell, a propósito de *la construcción del mecanismo que construyó y guió la conceptualización de la noción de campo electromagnético*, es decir, nos proponemos conceptualizar sobre la noción de Campo Electromagnético que Maxwell elaboró desde el análisis y caracterización del modelo mecánico que él desarrolló.

### **III. ANTECEDENTES**

Trabajos de grado por parte de los estudiantes de la Universidad Nacional y la Universidad Distrital que investiguen o analicen la creación de las ecuaciones de campo electromagnético, análisis del razonamiento de científicos en los procesos de creación científica o de temas relacionados no se encontraron. Sin embargo, se citan dos trabajos en especial porque se comparten ideas con la investigación.

Javier García Cruz y Fabio Martínez Gutiérrez (1999). Su trabajo es una propuesta didáctica para la conceptualización de las ecuaciones de Maxwell, inician con la presentación de las ecuaciones en forma integral, luego, con la presentación en forma diferencial para llegar a reconstruir las teorías electro y magneto-estática, para profundizar en el significado y aplicaciones de las ecuaciones de campo electromagnético. “Una propuesta didáctica para la conceptualización de las ecuaciones de Maxwell” Universidad Nacional de Colombia.

Cesar Herreño Fierro y Emerson Quiñones Montañés (1999). Realizan un diagnóstico del nivel de conceptualización de los estudiantes de Licenciatura en Física de la U.D. para producir información base para futuras reformas curriculares. “La conceptualización como condición básica para la solución de problemas de Física (Estudio diagnóstico del estado de conceptualización de los estudiantes del Proyecto curricular de Licenciatura en Física de la Universidad Distrital)”.

### **IV. OBJETIVOS**

#### **a. Objetivo General**

Establecer las características principales del razonamiento basado en modelos seguido por Maxwell para crear la modelación del concepto de campo electromagnético.

#### **b. Objetivos Específicos**

Caracterizar el método histórico-cognitivo para analizar el proceso de razonamiento seguido para crear conceptos científicos.

Identificar los modelos usados por Maxwell en el proceso de razonamiento para crear la modelación del concepto de campo electromagnético.

## 1. FUNDAMENTOS SOBRE LA CONCEPTUALIZACIÓN.

### 1.1. ¿Por qué hablar de conceptos en física?

Al plantear la cuestión: *¿por qué hablar de conceptos en física?* Pretendemos analizar y comprender qué hay en ellos, qué contienen, para qué sirven y, principalmente, qué papel tienen en el aprendizaje de la física. Aunque la cuestión inicial es bastante abarcadora y problemática, es necesario darle respuesta para fundamentar la pertinencia de la metodología que sigue esta monografía. De esta manera respondemos a tal cuestión con base en la *Teoría de los Campos Conceptuales* de Gérard Vergnaud.

Como su autor lo expresa esta es una teoría psicológica de la *conceptualización de lo real* o del *concepto*. Tres de las conclusiones que podemos formular de esta teoría son, primero, el conocimiento está organizado y contenido en lo que él llama “campos conceptuales”. Segundo, un campo conceptual se construye como causa de diversos factores y situaciones. Tercero, la piedra angular en la cognición y en el desarrollo cognitivo es la conceptualización, esto quiere decir, que la comprensión conceptual es el elemento base y fundamental para la madurez de algún conocimiento en las personas.

Vergnaud define campo conceptual como un *conjunto informal y heterogéneo de conceptos, problemas, situaciones, relaciones, estructuras, contenidos y operaciones del pensamiento contenidos unos a otros y, probablemente, entrelazados durante el proceso de adquisición* (citado en Moreira, 2002 p. 2). Resultará más práctico ejemplificar qué son los campos conceptuales, para comprender mejor lo que dice el párrafo anterior y, también, para ser más precisos y explícitos con la respuesta a la pregunta *¿por qué hablar de conceptos en física?*, planteada al inicio de esta sección.

Vamos a pensar que existe un sujeto que nominaremos como X; (1) él sabe que si no abraza bien a su hermanita que tiene seis meses, ella se puede caer de sus brazos. (2) También sabe que él corre más rápido que su mamá; (3) cuando juega béisbol sabe que su primo “*el gordo*” golpea más duro la pelota que él, por lo tanto, esta llega más lejos; (4) él sabe que duele más dejar caer desde la cintura hasta los pies una pelota de golf que una de tenis. Su vida está enriquecida de experiencias con el mundo físico y como consecuencia de ello, (1) X sabe que los cuerpos caen sino son sujetados o sostenidos por algún otro, aunque él no tenga plena conciencia, explicito o hable de aceleración gravitacional, peso o que los cuerpos caen como causa de la fuerza gravitacional que ejerce la Tierra

sobre todos y cada uno de los cuerpos que están inmersos en ella. (2) X, también, sabe que hay cuerpos que se mueven más rápido que otros, aunque él no explicita o hable de velocidad o aceleración. (3) Sabe que cuando dos cuerpos chocan los efectos son diversos y dependen de las condiciones iniciales, aunque no hable de estado, trayectoria, dirección, cantidad de movimiento, transferencia de energía. (4) Sabe que algunos cuerpos golpean más fuerte que otros, aunque no hable de masa, peso, energía, aceleración y demás.

Por supuesto, la vida de X está llena de muchas más experiencias y detrás de cada una de ellas, él tiene muchas más *imágenes o representaciones* aunque no las haga explícitas o lo que es igual, no tenga plena conciencia de su comprensión sobre el mundo físico. Lo expuesto de la vida de X nos lleva a una primera conclusión: cada experiencia que tenemos con el mundo físico nos permite generar una *imagen o representación* sobre éste mundo. Lo que hemos concebido como *imagen o representación* se conoce en la teoría de Vergnaud como esquema. *Llamamos “esquema” a la organización invariante de la conducta para una clase de situaciones dada, o lo que es igual, a la totalidad dinámica organizadora de la acción del sujeto para una clase de situaciones específicas* (Vergnaud 1990, p. 2).

Esto quiere decir, por ejemplo, que del juego de béisbol con su primo “*el gordo*” y de experiencias similares (p.e. juegos como el tenis o yermis), X reconoce que existen situaciones en donde su dinámica necesita de dos elementos (pelota (p)-bate; p-raqueta; p-tabla). Él concibe que un sujeto debe lanzar el primer elemento (pelota) a un segundo sujeto y que éste debe responder golpeando el primer elemento con el segundo elemento (bate o raqueta), que el sujeto que golpea el primer elemento se debe mover de una manera particular, y demás. Es a esa “organización y orden” de las acciones que reconoce y concibe X de la situación particular, lo que Vergnaud llama esquema. Él además reconoce que los *esquemas siempre reposan sobre una conceptualización implícita*, que como ya lo habíamos mencionado, para el caso del juego, X sabe que cuando dos cuerpos chocan (p.e. bate-pelota) los efectos son diversos y dependen de ciertas condiciones, aunque no explicita o hable de estado, trayectoria, dirección, cantidad de movimiento y demás.

Los esquemas son los principales elementos en la teoría de los campos conceptuales de Vergnaud porque son ellos los que le dan sentido a las situaciones o a los significantes. *Son los esquemas evocados en el sujeto individual por una situación o por un signifiante lo que constituye el sentido de esta situación o de éste signifiante para éste sujeto* (Vergnaud 1990, p. 15). Los esquemas

los construye el sujeto de su experiencia cotidiana en la casa, en el parque, en la escuela, en cualquier lugar. Entonces, hasta aquí hemos dicho lo siguiente, primero, de la experiencia cotidiana con el mundo físico, todos construimos esquemas (*imágenes o representaciones*) de éste mundo. Segundo, son los esquemas los que le dan sentido a las situaciones o a los significantes<sup>2</sup>. Tercero, todo esquema reposa siempre sobre una conceptualización implícita.

Pero, por qué hablar de esquemas, situaciones o significantes si nuestro interés es analizar y comprender el por qué hablar de conceptos en física. Pues bien, Vergnaud considera que los conceptos se fundan sobre tres conjuntos:  $C(S, I, \mathcal{R})$ . Y los define de la siguiente manera (Vergnaud 1990, p.7):

- S: conjunto de las situaciones. Ellas son las que le dan sentido al concepto. (la referencia).
- I: conjunto de invariantes operatorios. Sobre ellos es que reposa la operacionalidad de los esquemas. (el significado).
- $\mathcal{R}$ : conjunto de las formas lingüísticas y no lingüísticas que permiten representar simbólicamente el concepto, sus propiedades, las situaciones y los procedimientos de tratamiento. (el significante).

Una situación está compuesta, en general, por más de un esquema, tomemos de nuevo el partido de béisbol para ejemplificar lo formulado: vamos a suponer, que “*el gordo*” es el pitcher y que X es el bateador, como ya sabemos “*el gordo*” debe lanzarle la pelota a X, éste debe golpearla muy fuerte, y luego salir a correr pasando por cada una de las bases de la cancha recorriéndolas en el orden correcto, esta dinámica se repite durante el juego con diversos lanzadores y bateadores. El partido de béisbol se convierte en una situación para X y ella puede generar o evocar diversos esquemas en él, un primer esquema puede ser desde que “*el gordo*” lanza la pelota hasta que X la golpea, otro puede ser, desde que X golpea la pelota hasta que llega a la última base, otro puede ser cuando X es ahora el pitcher, entre otros<sup>3</sup>. Al decir que todo esquema reposa siempre sobre una conceptualización significa que X ya concibe cómo se juega el juego, cómo se debe mover cuando batea, cómo se debe mover después de golpear la pelota, o cómo cuando es pitcher, sin embargo la conceptualización no son los hechos, ella está contenida en ellos, esto quiere decir, por ejemplo que X ya sabe que todo cuerpo que se lance hacia

---

<sup>2</sup> Los significantes pueden ser grafos, símbolos, entre otros. Sin embargo, no vamos a trascender en ello, ni en dilucidar o profundizar en todos y cada uno de los elementos que contiene la teoría de Vergnaud porque el hacerlo no redundaría en el cumplimiento del objetivo planteado al inicio del capítulo.

<sup>3</sup> Como ya se había mencionado un esquema se puede entender como la *totalidad dinámica organizadora de la acción del sujeto para una clase de situación específica*.



arriba volverá a caer aunque no hable de peso, él sabe que es posible cambiar el movimiento de un cuerpo (p.e. la pelota) por medio de otro (p.e el bate), aunque no hable de fuerza.

Cada situación nueva para X generará, en algún grado, un aprendizaje en él, cada situación en la que X esté le generará o evocará esquemas e intrínsecamente una conceptualización, un conocimiento que pueda que no sea expresado explícitamente por él o más aún, un conocimiento del cual no tiene plena conciencia que está en él, pero que existe. Dentro de esa conceptualización hay un conocimiento implícito y es precisamente a ese conocimiento implícito lo que Vergnaud llama *invariante operatorio*. Son verdaderamente estos los que le dan sentido y significado a *los* esquemas. De acuerdo con la definición del conjunto  $S^4$ , las situaciones son las que le dan sentido al concepto, pero lo cierto es que el sentido lo dan los esquemas e intrínsecamente los invariantes operatorios<sup>5</sup>, sin embargo los conceptos no están compuestos tan sólo de invariantes, sino de ese triplete de conjuntos de acuerdo con Vergnaud.

La teoría de los campos conceptuales nos ofrece, entonces, un marco teórico para comprender cómo se organiza o “*ubica*” nuestro conocimiento. Ella logra legitimar cómo nuestro conocimiento (que en principio se puede entender como en un “*estado de inconsciencia*”) está contenido en la conceptualización, es por ello que al plantear la cuestión ¿por qué hablar de conceptos en física? fundamentamos y reconocemos que en el acto de conceptualizar el sujeto logra comprender ese *algo* (por *algo* nos referimos a su objeto de estudio), dimensiona en algún grado la extensión de lo que dice o quiere decir ese *algo*, sistematiza y organiza la información que contiene ese *algo*, su conocimiento sobre ese *algo* es intrínseco y está contenido en la conceptualización de ese *algo*. Todo esto manifiesta el papel de los conceptos en el aprendizaje de la física, es a través de ellos, o mejor, de su **conceptualización** que se gesta, crece y madura nuestro conocimiento, propiamente, nuestro conocimiento desde y sobre el escenario de las teorías físicas. De lo anterior se concluye que la *comprensión conceptual* es elemento vital para la madurez de algún conocimiento.

De acuerdo con lo expuesto de la teoría de Vergnaud, quizás ya sea más explícito que los conceptos contienen toda una representación que involucra un conocimiento intrínseco, dinámico y, en general, abarcador, además que ellos son estructuras bastante complejas y abstractas. Ellos contienen un entresijo de elementos que son los que le dan sentido y vida a su existencia, pero quizás lo más

---

<sup>4</sup> Un concepto se funda sobre tres conjuntos:  $C(S, I, \mathbb{R})$ .

<sup>5</sup> Existen tres tipos de invariantes operatorios.

importante de lo expuesto hasta aquí, es que se ha fundamentado que lo imperativo de los conceptos, especialmente, desde el marco de la enseñanza, está en la “conceptualización que se hace de ellos”. La conceptualización es el timón que dirige el barco de navegación sobre el mar de la comprensión y el conocimiento de las teorías físicas. ¿Pero para qué hablar de todo esto?

Es decir, ya hemos hablado y fundamentado del por qué es necesario hablar de conceptos en Física, del papel que juegan en el aprendizaje de la Física, así mismo, en el penúltimo párrafo de la página cuatro (4), dijimos que considerábamos más pertinente analizar los conceptos desde su dinámica de gestación y desarrollo, y con ello analizar cómo se construye el concepto, por qué se construye, entre otras cuestiones. Sin embargo, aún no hemos hablado cómo se puede llevar a cabo esto, lo cual significa que no hemos mencionado cuál va a ser la estrategia para analizar la dinámica de gestación y desarrollo de los conceptos. En la siguiente sección se hablará sobre la metodología que permite realizar éste tipo de análisis.

## ***1.2. El método histórico-cognitivo***

Como ya se había mencionado una de las dificultades más álgidas en la enseñanza de la física es la esterilidad en la comprensión conceptual de los “conceptos” y, en general, de las teorías físicas. Planteamos que una de las posibles causas que genera dicha esterilidad se debe a la manera en la que son tratados y enseñados los conceptos, encontrando que ellos se suelen mostrar como productos terminados. Con base en esto, resulta entonces legítimo preguntarse ¿Por qué surge un concepto? ¿Cuál es el proceso que conlleva su creación? ¿Cómo se podrían enseñar los conceptos, de tal forma que se depure la imagen de “producto terminado” y que lleve a mejores conceptualizaciones? Debemos responder a estas preguntas para no quedar tan sólo en la teorización de una problemática, quizás para muchos ya evidente, pero que aún no encuentra respuesta. Esto sugiere, aún más, la importancia de analizar la dinámica conceptual<sup>6</sup> en la enseñanza de la física.

Nancy Nersessian diseñó un método para investigar los procesos de creación e innovación de conceptos, particularmente, de conceptos físicos. Su método se conoce como “El Método Histórico-Cognitivo”. Pero antes de hablar de ¿qué dice el método o cómo funciona? vamos a hablar acerca de

---

<sup>6</sup> Por dinámica conceptual nos referimos al proceso de gestación y desarrollo de un concepto.

¿cómo surge éste método? Ella considera que las innovaciones conceptuales cambian o alteran nuestra forma de concebir el mundo y que su creación está condicionada por el contexto socio-cultural y cognitivo en el cual se encuentra inmerso el investigador (científico). Así mismo, plantea dos cuestiones interesantes a propósito de los conceptos físicos: cómo surgen estos elementos y qué mecanismos cognitivos subyacen en la creación de dichos elementos (Nersessian 2008).

De este modo, Nersessian parte del reconocimiento, primero que los conceptos surgen como producto de una situación problemática y segundo que el meollo con los conceptos es representacional. Con respecto a lo primero, ella dice que los conceptos le dan respuesta a un problema, pero dicha respuesta no se elabora de manera instantánea, ni es evidente. Por el contrario conlleva todo un proceso de investigación y de desarrollo, en el cual se hace uso de recursos conceptuales, materiales y analíticos proporcionados por el contexto socio-cultural. Como se puede ver, lo planteado por Nersessian parece darle luz a la imagen de *producto terminado* que buscamos depurar, y a lo formulado por la UNESCO acerca de la visión ahistórica y aproblemática<sup>7</sup> que genera la acción educativa sobre las ciencias.

Con respecto a lo segundo, ella dice que el problema con los conceptos es representacional: *“cómo representar la información conocida tal que permita inferencias satisfactorias, que vayan más allá del objeto de información y que lleve a nuevas hipótesis para posteriores investigaciones”* (Nersessian 2008). Esto significa, que la creación conceptual surge como producto de la racionalización de una realidad física, sin embargo a tal racionalización la abarca un problema: cómo es posible transmitir o comunicar la información que se ha obtenido e interpretado de esa realidad, de tal manera que de acuerdo con la forma en que se represente o transmita, genere las inferencias más satisfactorias o acertadas del objeto de información (realidad física), pero además que vaya más allá de dicho objeto de información, esto quiere decir, que deje las puertas abiertas para dimensionar más profundamente ese objeto de información y/o su entorno.

---

<sup>7</sup> Al presentar unos conocimientos ya elaborados, sin siquiera referirse a los problemas que están a su origen se pierde de vista que, como afirma Bachelard (1938), “todo conocimiento es la respuesta a una cuestión”, a un problema. Este olvido dificulta captar la racionalidad del proceso científico y hace que los conocimientos aparezcan como construcciones arbitrarias (2005, p. 39-40).

Lo mencionado por Nersessian manifiesta y certifica que, efectivamente el problema de la conceptualización es un problema representacional y comunicativo. Lo cual guarda una estrecha relación y resulta ser coherente con lo que dice Evandro Agazzi (1978) acerca de qué es una teoría<sup>8</sup>.

Es así como Nersessian inicia su investigación; ella parte del reconocimiento que los conceptos surgen como producto de una situación problemática y que el problema con los conceptos es representacional. Pero antes de continuar vale la pena reflexionar sobre: de qué forma es posible conocer en mejor medida la representación que quiso dar a conocer el investigador, de qué elementos se disponen o se pueden hacer uso para llegar a conocer esa representación lo más fiel y cerca posible, de tal modo que se vislumbre su proceso de creación y la problemática por la cual surgió. Son relevantes estas preguntas porque de acuerdo con las respuestas que se les dé, ellas constreñirán la metodología de investigación que se debe seguir para cumplir con parte de nuestro objetivo, es decir, con cómo analizar la dinámica conceptual.

Nersessian responde a estas cuestiones y le da inicio a su investigación ubicada desde un escenario que en *Filosofía de las Ciencias* se conoce como Epistemología Naturalizada, la cual se centra, como lo dice ella, en el estudio acerca de ¿qué hacen los científicos? Esto quiere decir, que su investigación se debe centrar en las prácticas científicas. Nersessian reconoce que su investigación requiere de un estudio interdisciplinar y se da cuenta que: “Investigaciones realizadas en Historia de las Ciencias proporcionan registros de las prácticas de investigación en las cuales surgieron nuevos conceptos científicos. Por otro lado, investigaciones en Ciencias Cognitivas permiten analizar las prácticas científicas y comprenden un amplio rango de estudios sobre cómo los humanos razonan, representan, resuelven problemas y aprenden” (Nersessian 2008).

En el marco de lo referido, hemos hablado del cómo surgió el método, y con ello hemos abordado las cuestiones y elementos que orientaron el cómo debe ser la metodología que analice la dinámica conceptual, en qué se debe centrar la metodología, así mismo, también se habló de las

---

<sup>8</sup> Una teoría es un lenguaje que se refiere a un cierto universo de objetos. Por lenguaje se entenderá todo el conocimiento que se tiene de algún objeto de estudio y que se pretende comunicar de una manera particular. Por universo de objetos, él se refiere no sólo a un conjunto de elementos, sino a éste conjunto provisto también de todas las propiedades y relaciones definibles sobre sus elementos. Entonces una teoría es la consolidación del conocimiento que se tiene de algún universo de objetos, éste conocimiento que supone ser legítimo se da a conocer, pero la manera en la que se da a conocer es propia del investigador, con esto se quiere decir, es que está sujeta a las “*acepciones y concepciones*” de él.

disciplinas que permiten analizar la dinámica conceptual. Ahora nos queda responder el qué dice El Método Histórico-Cognitivo.

Desde la dimensión histórica se aborda el análisis y estudio *histórico* del producto intelectual del científico, es decir, artículos, borradores, escritos, cartas, entre otros. Desde la dimensión cognitiva, se hace uso de las investigaciones de las ciencias cognitivas para entender las bases de las prácticas científicas, es decir, para entender los modelos, las representaciones y los demás mecanismos que le permiten dar continuidad a la práctica científica. También, se hace uso de las ciencias cognitivas para reflexionar sobre muchas de las consideraciones que surgieron o se tuvieron en cuenta en el análisis de la resolución del problema científico.

Pero la dimensión cognitiva no aborda sólo el estudio del producto intelectual del investigador, es decir, no sólo estudia modelos, representaciones, escritos y demás, sino que también busca interpretar por qué cada paso que daba el investigador se puede considerar como un paso razonable, es por ello que la dimensión cognitiva hace uso de investigaciones sobre las prácticas científicas que analizan cómo es que los humanos razonan, resuelven problemas, representan y aprenden. También, se considera importante precisar que realizar un estudio histórico no sólo contextualiza el objeto de estudio en una dimensión social y cultural, sino que ello permite humanizar esa acción investigativa, ese objeto de estudio porque lleva a reconocer que quien realizó tal investigación fue un *ser humano* con capacidades y dificultades que un “*ser humano del común*” puede tener.

En síntesis el Método Histórico-Cognitivo se enfoca en el análisis de las representaciones y los modelos que construye y desarrolla el investigador con respecto a un fenómeno en particular y desde allí se interpreta que pretendía dilucidar y comunicar el investigador. Es por ello que el método pretende analizar el proceso creativo de investigadores en momentos de creatividad conceptual, teniendo en cuenta “qué capacidades y limitaciones cognitivas surgieron en su proceso de investigación” (Nersessian, 2008 p.6). En el siguiente capítulo echaremos mano de esta metodología de investigación para analizar la construcción del modelo mecánico que constriñó y guió la conceptualización de la noción de campo electromagnético desarrollada por el ingenioso y audaz James C. Maxwell.

# COMPRENSIÓN DE LA REPRESENTACIÓN DEL CONCEPTO DE CAMPO ELECTROMAGNÉTICO DE MAXWELL

## 2.1. Contextualización histórica.

Como se dijo en la primera parte de esta monografía, nuestro objetivo es conceptualizar acerca de la noción de Campo Electromagnético con base en la conceptualización desarrollada por James C. Maxwell durante un periodo de aproximadamente veinticuatro años<sup>9</sup>. Sin embargo, hasta ahora sólo hemos hablado del por qué es importante conceptualizar<sup>10</sup> y de qué manera se puede hacer<sup>11</sup>, pero aún no hemos abordado la conceptualización en sí misma. En lo que sigue de la monografía nuestra atención se centrará en conceptualizar acerca de la noción de Campo Electromagnético. Así y teniendo en cuenta lo planteado en el capítulo precedente el primer paso es explicitar el contexto histórico en el que se desarrolla el trabajo de Maxwell, y con ello abordar cuál fue la problemática que llevó a la creación del concepto de campo *electromagnético* (EM), por qué surgió tal problemática y qué cosmovisión existía al respecto antes de crearse tal concepto.

Es inevitable abordar el contexto histórico sin antes expresar que uno de los elementos más apasionantes y fascinantes que se encuentra en la historia de la física está en el hecho de poder reconocer y visualizar la creatividad, perspicacia y audacia que tienen los edificadores de la Física; también está en el hecho de vivir y saborear esa forma novelística y genuina en la que convergen las historias y los trabajos de diferentes edificadores y protagonistas de la Física. Pues bien, la problemática que hay detrás de la creación del concepto de campo EM y todos los hechos que conllevan a su creación tienen ese toque apasionante, fascinante, novelístico y genuino. Sin embargo, por cuestiones pragmáticas esbozaremos sólo algunos de los eventos que nos *inducen* a la enrevesada historia que nos atañe con la esperanza que la selección que se ha hecho de ellos nos muestre la panorámica del trabajo de nuestro principal protagonista J. C. Maxwell.

---

<sup>9</sup> Este periodo se ha calculado teniendo en cuenta dos aspectos, primero, el año de publicación del primer artículo (1855-1856) que desarrolló Maxwell sobre el fenómeno electromagnético. Segundo, el año de fallecimiento de Maxwell (1879).

<sup>10</sup> Lo cual se desarrolló a través de la Teoría de los Campos Conceptuales de Gerard Vergnaud.

<sup>11</sup> Es decir, cuál va a ser nuestra metodología para conceptualizar: el método histórico-cognitivo.

El trabajo de Maxwell se lleva a cabo teniendo de fondo una pregunta planteada desde la antigua Grecia: *¿cómo puede un cuerpo obrar sobre otro estando distanciados?* Y, también teniendo de fondo, un conjunto de fenómenos cuya explicación se plantea hacer Maxwell desde una perspectiva matemática. Estos fenómenos son: El experimento realizado por Hans Oersted en 1820, quien descubrió que una corriente eléctrica afecta una aguja magnética. El segundo, un experimento realizado por André Ampère, quien descubrió que al ubicar de manera paralela dos alambres rectos por los cuales circula corriente eléctrica, estos se atraen o se repelen dependiendo de la dirección en la que circulan las corrientes por cada alambre. Y el tercero, un experimento realizado por Michael Faraday en 1831 quien descubrió que al imantar un anillo de hierro mediante una corriente eléctrica, éste induce una corriente eléctrica sobre otro alambre que estaba enrollado a él. Este fenómeno es conocido como *inducción electromagnética*.

A principios del siglo XIX se pensaba que sólo podían existir interacciones entre fenómenos de la misma naturaleza, y para ese entonces no se consideraban los fenómenos eléctricos y magnéticos de una misma naturaleza. Por lo tanto, el descubrimiento de Oersted planteaba unas cuestiones: *¿cómo pueden interactuar cuerpos que ejercen fuerzas de distinta naturaleza?*, y más aún, *¿cómo pueden interactuar a distancia?* Posteriormente, el descubrimiento de Ampère de la interacción entre corrientes, obligaba a pensar acerca de *¿cómo una corriente eléctrica puede interactuar sobre una aguja magnética, pero también sobre otra corriente eléctrica?* Además, se planteaba de nuevo la cuestión *¿cómo pueden interactuar las corrientes a distancia?* Estas preguntas aumentaron el interés en el análisis acerca de si podría existir alguna relación entre la naturaleza de la electricidad y la naturaleza del magnetismo; cómo puede una acción de naturaleza eléctrica generar una acción de naturaleza magnética; será también posible la situación inversa, que una acción de naturaleza magnética genere una acción de naturaleza eléctrica. El descubrimiento de Faraday demostró que es posible generar efectos eléctricos (corriente eléctrica) mediante fenómenos de naturaleza magnética (anillo imantado).

Los fenómenos mencionados llevaron a pensar en la íntima relación que debía existir entre la electricidad y el magnetismo. Y además, a considerar *el espacio* como una entidad física que juega un papel relevante en el desarrollo de estos fenómenos; Dando paso a la evolución de la concepción de Campo Electromagnético.

### 2.1.1. La cosmovisión antes de Maxwell.

Cuando se habla de “la cosmovisión”, se habla de “la manera de ver e interpretar el mundo”, es decir, del cómo se conciben y se explican los fenómenos físicos. Sin embargo, el uso que aquí le damos a este vocablo no es tan abarcador. Hablamos de cosmovisión para referirnos a la manera de ver e interpretar los fenómenos de naturaleza eléctrica y magnética. Pero antes cabe preguntarse, ¿para qué hablar de la cosmovisión antes de Maxwell? Hay varias razones por las cuales hablar de la cosmovisión antes de Maxwell. Primero, porque cuando se habló del Método Histórico - Cognitivo, se mencionó que Nersessian (2008) consideraba que las *innovaciones conceptuales* cambian o alteran la manera en la que concebimos el mundo, entonces, hablar de la cosmovisión que hubo antes de Maxwell nos llevará a reconocer la magnitud de la nueva cosmovisión. Segundo, porque hablar de esta cosmovisión da respuesta a la pregunta que se planteó en el preámbulo de éste capítulo ¿qué cosmovisión existía antes de crearse tal concepto? La cual a su vez se formuló teniendo en cuenta lo expuesto de Nersessian. Y tercero, porque hablar de la cosmovisión antes de Maxwell también, nos deja ver en mayor grado el panorama del contexto histórico y la situación problemática en la cual, él se encontró inmerso. Este aspecto, también es importante porque nos brinda más elementos para interpretar y entender el camino que tomó Maxwell con sus investigaciones.

De este modo, lo primero que hay que decir es que antes de la época de Maxwell se desarrolló una cosmovisión universal muy potente, alcanzó un alto status, gozó de gran respeto, gloria y aceptación dentro de la comunidad científica y resultaba ser correcta para explicar, en general, cualquier tipo de movimiento de los cuerpos. Esta manera de ver e interpretar el mundo la construyó Isaac Newton y se fundó sobre la conceptualización de *fuerzas* y de *acción inmediata a distancia*. Para él, la fuerza es una acción ejercida por un cuerpo sobre otro, causante de que este último cambie su estado de reposo o de movimiento uniforme. Además, la fuerza que ejerce un cuerpo sobre otro actúa inmediatamente y a distancia, esto quiere decir, que para Newton el *espacio* que rodea a dos cuerpos que interactúan no afecta, ni tiene nada que ver con la acción que se transmite de un cuerpo a otro. Tres aspectos para resaltar de la teoría de Newton son: (1) Las acciones se transmiten a distancia e instantáneamente. (2) El espacio está vacío. (3) La fuerza de la acción depende de la posición del cuerpo sobre el que se ejerce la fuerza y es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que hay entre los cuerpos.



Debido a ese alto estatus que alcanzó la cosmovisión newtoniana, cualquier explicación posterior que se diera a fenómenos físicos no podía ignorar lo que esta decía. “*la teoría de Newton era sorprendentemente superior, en la predicción de nuevos resultados, a cualquier teoría precedente en la historia del pensamiento humano y conoció gran éxito en sus predicciones. Se convirtió en un punto de referencia que no podía ser ignorado por ninguna otra teoría posterior*” (Berkson, 1981 p. 19). Es así como la cosmovisión newtoniana era un referente absoluto para el desarrollo de cualquier teoría física.

De este modo, diferentes investigadores desarrollaron explicaciones e interpretaciones desde un marco newtoniano sobre la electricidad estática, el magnetismo, la inducción de corrientes, la atracción de corrientes, entre otros fenómenos. Coulomb, Ampère y Weber fueron algunos de estos investigadores. Queremos resaltar que fue Weber, según Maxwell (1864) quien desarrolló una teoría más completa al respecto. Con esto Maxwell se refiere a que Weber investigó sobre los fenómenos de naturaleza electrostática, eléctrica, magnética y electromagnética, y logró unificarlos, es decir, logró tratar a tales fenómenos dentro de una sola teoría. Además, lo pudo hacer como lo dice Maxwell, de una manera científica, es decir, de una manera formal o cuantitativa. Este hecho es destacable porque construyó una *cosmovisión* que le brindaba respuestas a las cuestiones que surgieron de los descubrimientos hechos por Oersted, Ampère y Faraday. Destacamos de la cosmovisión de Weber que él asumía que la fuerza entre dos *partículas eléctricas* depende de sus velocidades relativas y de la distancia que hay entre ellas. “*Las partículas eléctricas son entidades físicas que constituyen la corriente eléctrica*” (Berkson, 1981 p.163).

Sin embargo, no todos los investigadores del siglo XVIII abordaron dichos fenómenos siguiendo la cosmovisión newtoniana, el mayor ejemplo de ellos es Michael Faraday. Él no estaba de acuerdo con considerar que las acciones eléctricas y magnéticas, inclusive las acciones gravitacionales y de otra naturaleza, se transmitieran a distancia instantáneamente. Para Faraday, como para muchos de nosotros, era ininteligible que la acción de un evento físico “*desapareciera*” de repente en un lugar del espacio y *apareciera* al siguiente instante en otro lugar, es decir, para él existía un tiempo de retardo para que se comunicara la acción de un cuerpo a otro, lo cual significaba que la velocidad con que se transmite la acción es *finita*. De acuerdo con esto, la atracción que sucede entre dos alambres por los cuales circula corriente eléctrica (descubrimiento de Ampère), no ocurre de manera instantánea una vez están abiertos los circuitos, sino que existe un tiempo para que los alambres se comuniquen las acciones que producen el movimiento.

Para Faraday, el *espacio* donde ocurren todos los eventos físicos *no está vacío*, sino que está lleno de *campos de fuerzas*, esta es la condición en la cual se encuentra el espacio. Los *campos* son la causa de las *fuerzas* que se ejercen sobre cuerpos inmersos en estos campos. Esto quiere decir, de acuerdo con Faraday, que al ubicar un cuerpo cargado eléctricamente en una región cualesquiera del espacio, dicho cuerpo *no crea un campo eléctrico* en la región circundante a él. Lo que sucede es que el cuerpo puesto en esa región arbitraria del espacio “altera” el *campo de fuerzas* de dicha región y es, precisamente, esa alteración la que se comunica o transmite a un cuerpo de prueba que se encuentre inmerso en esa región alterada. Esta era una visión contradictoria a la newtoniana porque para Newton “*las fuerzas eran causadas directamente por los cuerpos, no por el campo*” (Berkson, 1981 p 148).

Estas fueron dos de las cosmovisiones que precedieron al trabajo de Maxwell. Hemos tomado sólo algunos aspectos relevantes de los que se constituye cada cosmovisión para cumplir con el propósito de esta sección, sin que ello nos lleve a abordar todos los aspectos y la profundidad que requieren las dos cosmovisiones.

### **2.1.2. Situación problemática de Maxwell.**

La situación problemática de Maxwell la podemos sintetizar de la siguiente manera. Para él, el estado teórico en el cual se encontraba la electricidad y el magnetismo era “*desfavorable*”. Con esto Maxwell se refería a que los avances teóricos con que contaban estas ciencias para la época<sup>12</sup> estaban atomizados, además parte de ellos se limitaban a formulaciones matemáticas sin establecer filiaciones entre distintos aspectos que hacían parte de las ciencias (Maxwell, 1855-1856 p. 155). Maxwell reconocía, por ejemplo, que la cosmovisión desarrollada por Weber era la más completa para la fecha. Él le daba mérito importante al trabajo hecho por Weber por la ingeniosidad y aplicación que éste tenía para los diferentes aspectos de la ciencia como la electricidad estática y la atracción electromagnética. También le daba mérito a lo hecho por Weber porque servía para guiar el trabajo experimental y teórico de estas ciencias. Sin embargo, interpelaba las suposiciones en las que se basaba Weber como el hecho de considerar partículas que actúan a distancia y fuerzas que dependen de las velocidades con que se mueven las partículas (Maxwell, 1864 p. 527).

---

<sup>12</sup> Nos referimos hacia el año 1855 que fue cuando publicó su primer artículo sobre los fenómenos electromagnéticos.

Debido a esta situación, Maxwell consideraba posible dignificar el estado teórico de la electricidad y el magnetismo sólo mediante el diseño de una teoría que unificara todos los aspectos de las ciencias. Esto quiere decir, una teoría que hablara de la electricidad estática, la corriente eléctrica, la atracción entre corrientes, la inducción de corrientes (inducción electromagnética), entre otros aspectos. Maxwell se involucró con esta situación y se propuso brindarle una solución. Con base en esto, se interesó por construir un modelo mecánico (un mecanismo) para representar la dinámica de los fenómenos y así mismo, para que desde esa representación pudiera establecer las magnitudes electromagnéticas que le permitirían desarrollar el aspecto formal de la teoría unificada. Él había argumentado que parte del estado desfavorable en el que se encontraba la electricidad y el magnetismo era por causa de la complejidad y lo abstractivo que tenían las teorías que habían desarrollado sus contemporáneos al respecto.

Maxwell contaba con algunos recursos para dar respuesta a su situación problemática. Por un lado, estaba el trabajo hecho por M. Faraday. Subrayamos que lo hecho por Faraday estimuló y exhortó la mente y el interés de Maxwell por trabajar sobre esta ciencia. Maxwell, finalmente, se había interesado por llevar a una forma matemática el trabajo de Faraday porque veía en dicho trabajo un insumo para responder a su situación problemática. En éste trabajo Maxwell encontró experimentos, resultados y explicaciones de los mismos. Concepciones sobre la fenomenología electromagnética, entre ellas, la de *líneas de fuerza*. Maxwell también encontró en el trabajo de Faraday hipótesis y modelos visuales o representaciones sobre esta fenomenología.

Por otro lado, Maxwell tuvo en cuenta los trabajos que desarrolló W. Thomson sobre la Mecánica de los medios continuos y sobre termodinámica. Maxwell encontró en los trabajos de Thomson una concepción que fue vital para la evolución de su cosmovisión. La de *éter*: medio elástico bajo tensión con ciertas características y que se encuentra inmerso en el espacio. Maxwell tomó esta interpretación de Thomson con el propósito de representar la magnitud y la dirección de las fuerzas eléctricas, magnéticas y la de corrientes en un medio [el *éter*](Nersessian, 2008). Otra concepción que tomó de Thomson fue la de vórtices moleculares. Como su nombre lo indica son vórtices o remolinos de tamaño atómico inmersos en el espacio y de constitución *etérea*. Todo esto hizo parte de los recursos conceptuales con los que contó Maxwell para dar inicio a su trabajo. Pero, aún contaba con más recursos, por ejemplo, resultados experimentales como la ley de Coulomb y la ley de Ampère, así como la geometría cartesiana corresponden a recursos analíticos de su situación problemática. En la

siguiente sección veremos cómo Maxwell echó mano de estos recursos para responder su situación problemática, esto quiere decir, para construir el mecanismo que le permitiría desarrollar una teoría unificada de los fenómenos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos.

## **2.2. Modelo mecánico de Maxwell que subyace a la noción de Campo EM que él propuso.**

Como lo planteamos en el capítulo precedente, los conceptos surgen como producto de una situación problemática y conllevan todo un proceso de gestación y desarrollo. Para nuestro caso, ya hemos hablado del contexto histórico y con ello, de la situación problemática de donde surge el concepto de Campo EM que desarrolló Maxwell. Ahora, vamos a presentar la gestación y el desarrollo que tuvo éste concepto. Esta presentación la realizamos desde el análisis del proceso de creación y adaptación (modelación) que tuvo el mecanismo con que Maxwell llevó a cabo la elaboración de la teoría. Esto quiere decir, que mediante el proceso de modelación del mecanismo se presenta la gestación y el desarrollo que tuvo el concepto de Campo EM y con ello la conceptualización de esa noción. Para ello vamos a dividir su proceso de modelación en cuatro partes. El primero, aborda cómo el mecanismo representa las acciones magnéticas por medio de las líneas de fuerza. El segundo, aborda cómo el mecanismo representa la relación entre la corriente eléctrica y el magnetismo, centrandó esta relación en el fenómeno de inducción electromagnética. El tercero, aborda la relación que hay entre las magnitudes electromagnéticas y el mecanismo, mostrando cómo se definen estas magnitudes a partir del mecanismo. Y por último, se abordan algunas consideraciones finales sobre el mecanismo y su funcionamiento, centrandó esta parte en cómo el mecanismo representa otros aspectos de la fenomenología.

### **2.2.1. Las Líneas de Fuerza**

Maxwell inició explicando las *líneas de fuerza* de Faraday. Él hizo esto porque encontró que Faraday creía que en las líneas de fuerza hallaría la respuesta de cómo se transmiten las acciones magnéticas. Es decir, Faraday suponía que, la configuración que tienen las limaduras de hierro cuando están cerca de una fuente magnética, habla de la *dinámica de las acciones magnéticas*. Por lo tanto, al analizar todo el proceso que conlleva la configuración de estas líneas se podría interpretar la razón por la que las limaduras de hierro, al igual que un imán, reaccionan ante la presencia de una fuente

magnética. Para Faraday debía haber una explicación dinámica para la configuración geométrica de las líneas de fuerza (Nersessian, 2008). De este modo, él planteó que la distribución de las líneas magnéticas (líneas de fuerza) podría determinarse *suponiendo* que existe una tensión a lo largo de las líneas y una presión entre ellas (Berkson, 1981). La tarea de Maxwell era explicar cómo existe la tensión a lo largo de las líneas y la presión que hay entre ellas.

Lo primero que hizo Maxwell fue caracterizar el espacio. Para él esta entidad física está llena de éter. Este a su vez forma vórtices moleculares. Por medio de los vórtices Maxwell *modeló*, en primera instancia, la dinámica de las líneas de fuerza, es decir, la transmisión de las acciones magnéticas. La manera de hacerlo fue la siguiente: Maxwell supone vórtices moleculares distribuidos por el espacio que giran uno contiguo de otro. Cada vórtice tiene un eje sobre el cual gira y es paralelo a las líneas de fuerza (ver figura 1). El movimiento rotacional de los vórtices sería la causa por la cual existe presión entre las líneas magnéticas ya que éste tipo de movimiento hace que los vórtices ejerzan fuerzas centrífugas entre ellos, de manera recíproca.

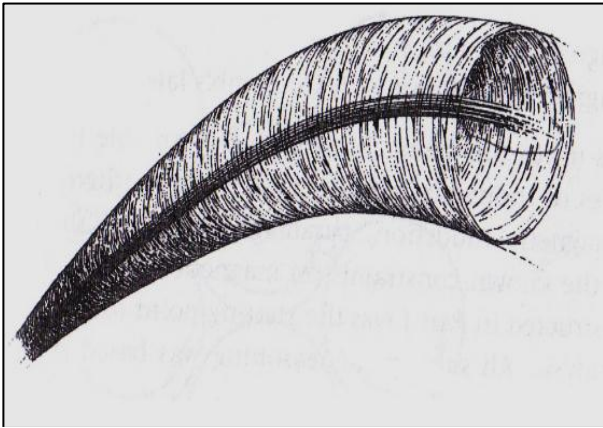


Figura 1. Esta imagen la diseñó Nersessian como producto de la interpretación que ella hace sobre la descripción que brinda Maxwell de cómo sería un único vórtice (Nersessian, 2008).

“Maxwell determinó que un medio fluido (el éter) con presión hidrostática simétrica alrededor del eje y una simple presión a lo largo del eje proporciona un modelo mecánico consistente con los dos constreñimientos de origen [(1) Existe tensión a lo largo de las líneas y (2) una presión entre ellas]. El exceso de presión en la dirección ecuatorial puede ser explicado como el resultado de la fuerza centrífuga de vórtices en el medio, con ejes paralelos a las líneas de fuerza. Es decir, el medio tendría movimiento de rotación... a fin de producir las líneas de fuerza en la misma dirección” (Nersessian, 2008 p. 30).

De acuerdo con el mecanismo, un vórtice que inicie desde una fuente magnética, por ejemplo, desde un imán, tendría un área transversal mayor a medida que éste se distancie del imán, esto explicaría por qué las líneas están más separadas cuando están más lejos del imán. La intensidad de las acciones magnéticas se representaría por medio de la velocidad con que giran los vórtices. Esto quiere

decir, que un vórtice que se encuentre más cerca de la fuente magnética giraría más rápido y tendría un área transversal pequeña, de ahí que las líneas estén más juntas cerca de la fuente magnética y que su intensidad magnética sea mayor (ver figura 2).

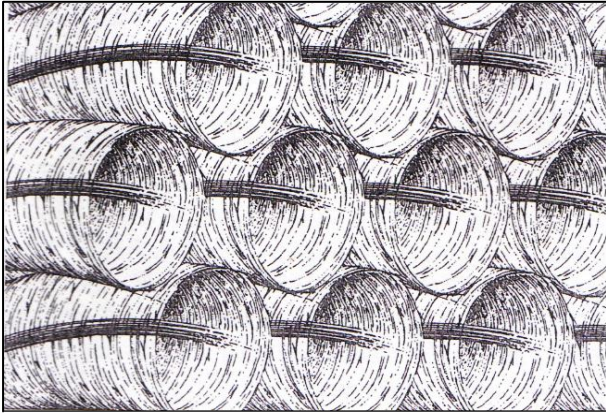


Figura 2. Esta imagen la diseñó Nersessian como producto de la interpretación que ella hace sobre la descripción que brinda Maxwell de cómo sería el medio lleno de vórtices (Nersessian, 2008)

De este modo Maxwell modeló las características de las líneas de fuerza. La dinámica de estas, es decir, la transmisión de las acciones magnéticas se modela por el movimiento de los vórtices. Esto quiere decir, que en el ejemplo de limaduras de hierro que reaccionan ante la presencia de un imán, se puede entender que la razón por la que estas reaccionan es porque los vórtices moleculares se estarían moviendo por toda la región circundante del imán. Este movimiento se va propagando por el espacio hasta llegar a alterar la configuración geométrica de las

limaduras de hierro. Es decir, la propagación del movimiento y a la vez, el mismo movimiento de rotación de los vórtices modelaría la transmisión de las acciones magnéticas, las cuales quedan representadas por medio de las líneas de fuerza. Queremos resaltar que con este mecanismo, Maxwell no buscaba representar fielmente la manera cómo se transmiten las acciones magnéticas, sino sólo *modelar* la manera cómo se podrían transmitir tales acciones.

### **2.2.2. Relación entre la corriente eléctrica y el magnetismo**

Maxwell se propuso abordar también, mediante su mecanismo la relación que hay entre la corriente eléctrica y el magnetismo. Descubrimientos como el fenómeno de inducción electromagnética hecho por Faraday hacían imperativo que se estableciera algún tipo de relación dinámica entre estas dos entidades. Faraday descubrió que mediante la circulación de una corriente eléctrica por un alambre conductor que se encuentra enrollado en una mitad de un anillo de hierro, puede inducir una corriente eléctrica temporal, sobre un segundo alambre conductor que se encuentra enrollado en la otra mitad del mismo anillo (Berkson, 1981). De este modo, Maxwell tuvo que modificar su mecanismo para llegar a establecer una relación entre la corriente eléctrica y el magnetismo. La manera en que modificó su mecanismo fue adicionándole una capa de partículas circulares alrededor de los vórtices. La figura 3

muestra la nueva versión del mecanismo. En ella, los vórtices se representan por medio de polígonos hexagonales y las partículas por medio círculos.

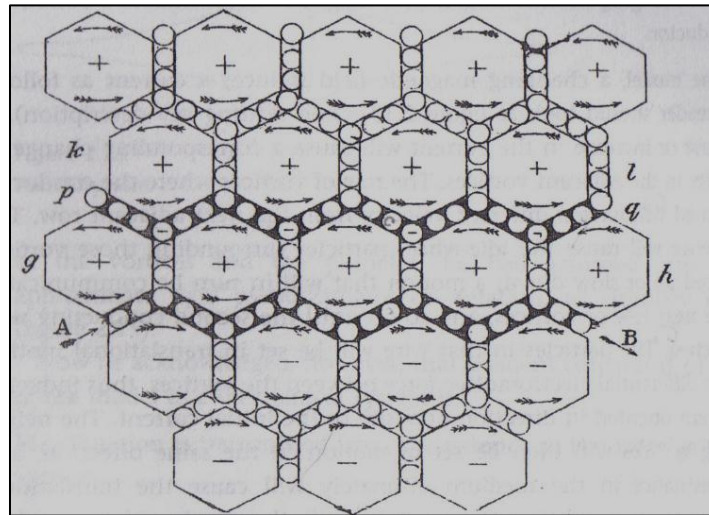


Figura 3. Esta imagen se tomó del libro de Nersessian (2008). Pero, es original de Maxwell.

La relación dinámica se establece mediante “engranajes” que hay entre las partículas y los vórtices. En el mecanismo, la circulación de una corriente eléctrica se representa por medio del desplazamiento de una fila de partículas, por ejemplo, fila AB (figura 3) que se mueve de derecha a izquierda. Cuando esta fila de partículas se mueve hace girar los vórtices adyacentes (fila gh) en dirección contraria. Es decir, las partículas además del movimiento de traslación, también estarían girando; si giran en dirección horaria, los vórtices girarían en dirección anti-horaria. Note que el mecanismo ya modela y explica por qué la circulación de una corriente eléctrica genera en el espacio adyacente la transmisión de acciones magnéticas.

Ahora, como la fila de vórtices (gh) está girando, por el engranaje que limita al mecanismo, su giro hace mover la fila de partículas adyacentes, es decir, a la fila “pq” y a las partículas que se configuran entre los vórtices (secciones verticales). Si la fila de partículas (pq) tiene libertad de desplazamiento<sup>13</sup> significa que se ha inducido una corriente eléctrica. Note que por la dirección en la que giran los vórtices (fila gh), las partículas que representan la corriente inducida se desplazarían en dirección opuesta al desplazamiento que tiene la corriente eléctrica de la fila AB. De este modo, el

<sup>13</sup> El movimiento de las partículas puede ser de traslación y de rotación. Ellas siempre podrán girar sin importar el medio en el que se encuentren. Pero, sólo se podrán desplazar si están en un medio conductor.

mecanismo mediante un funcionamiento mecánico *modela* cómo se transmiten las acciones eléctricas y magnéticas en el espacio (inducción electromagnética). Sin embargo, aún falta que se precisen detalles de la fenomenología, por ejemplo, por qué la corriente eléctrica inducida es temporal.

De acuerdo con el mecanismo, para que exista una corriente eléctrica como la que representa la fila de partículas AB, debe haber una fuente eléctrica que la genere. Así, estas partículas experimentarían en el momento en que se cierra el circuito una fuerza eléctrica (ejercida por la fuente eléctrica) que las obliga a que se muevan rápidamente generando una diferencia entre las velocidades de las partículas y los vórtices adyacentes (fila gh). Estos comenzaran a acelerar su movimiento hasta que equilibren sus velocidades con la primera fila de partículas (fila AB). Pero así mismo, estos vórtices comunicarían una diferencia de velocidades a la siguiente fila de partículas (fila “pq”). La diferencia de velocidad hará que estas partículas roten, y dependiendo de las características del medio, permitirá que ellas se desplacen induciendo así, una corriente eléctrica.

La diferencia de velocidades entre las partículas y los vórtices se anula cuando las filas de vórtices adyacentes a una fila de partículas giran a una misma velocidad anulando así, el movimiento de desplazamiento de estas partículas y, por lo tanto, ya no habría corriente eléctrica inducida. Es decir, suponga que las partículas de la fila “pq” tienen libertad de desplazamiento. Las filas de vórtices adyacentes a esta fila de partículas serían las filas “gh” y “kl”. La fila de vórtices “gh”, inicialmente, va a girar más rápido que la fila de partículas “pq” por la *acción* que le ha comunicado la fila de partículas AB, pero después de un pequeño tiempo esta acción se habrá comunicado a las fila de partículas “pq” y de vórtices “kl”, teniendo así los vórtices adyacentes a la fila “pq” velocidades iguales en dirección y en magnitud.

Una vez las filas de los vórtices adyacentes a esta fila de partículas equilibren sus velocidades anularan el movimiento de traslación de las partículas por las direcciones contrarias en las que girarían las superficies de contacto de los vórtices. Note que el movimiento inducido por el vórtice que está por debajo de la partícula es contrarrestado por el movimiento inducido por el vórtice que está por encima de la partícula. Es, esta parte de la causa por la que los vórtices logran anular el movimiento de traslación de las partículas. Se debe decir también, que los vórtices logran tener las mismas velocidades por propiedades elásticas que Maxwell le proporcionó al mecanismo, directamente, a los vórtices. La razón por la cual Maxwell tuvo que asumir esta hipótesis fue, primero para explicar la velocidad finita



con que se debían transmitir las acciones eléctricas y magnéticas. Segundo para explicar la electricidad estática (Nersessian, 2008; Berkson, 1981).

### 2.2.3. Definición de las Magnitudes Electromagnéticas a partir del Mecanismo de Maxwell.

La conceptualización de la noción de Campo EM queda robustecida si se especifican las magnitudes electromagnéticas que describen el Campo EM. El siguiente cuadro muestra cuál es la relación que hay entre aspectos del mecanismo y su funcionamiento con las magnitudes que describen el Campo EM. Queremos decir que las constantes de Campo indican que propiedades como la densidad (masa) y la elasticidad del éter, son propiedades variables del campo EM.

Nombre de la magnitud	Simbología	Mecanismo	Características
Intensidad de corriente	<b>J</b>	Número de partículas que pasan por un punto de la fila en un segundo	Son partículas que funcionan semejantes a un piñón loco. Ellas le transmiten un movimiento de rotación a los vórtices adyacentes.
Intensidad de la fuerza magnética	<b>H</b>	Su magnitud se representa por la velocidad con que gira el remolino en su superficie. La dirección viene dada por la dirección del eje.	Si el vórtice gira en dirección horaria, este representaría la dirección norte, "es decir, aquella hacia donde sería impulsado un polo norte magnético" (Berkson, 1981 p. 192).
Permeabilidad magnética	$\mu$	Densidad media de los remolinos (masa).	Sirve para caracterizar el poder con que se transmiten las acciones magnéticas.
Energía del campo magnético	$\mu H^2$		Corresponde a la energía cinética de los vórtices. Note que esta expresión es análoga a la expresión de la energía cinética de la mecánica:  $H^2 \rightarrow v^2$ $\mu \rightarrow m$

Fuerza electromotriz	<b>E</b>	“Esta fuerza representa la parte de la fuerza electromotriz debida a la inducción” (Berkson, 1981 p. 192).	Esta fuerza se genera cuando hay diferencia de velocidad entre vórtices adyacentes a una partícula. Debido a esto cada vórtice ejerce una fuerza tangencial sobre la partícula.
Constante dieléctrica	$\epsilon$		Sirve para caracterizar el poder con que una partícula se deja deformar por causa de la fuerza <b>E</b> .
Desplazamiento	<b>D</b>	Representa el desplazamiento que tendrían las partículas por causa de la fuerza <b>E</b> que ejercen los remolinos.	Las partículas se desplazan cuando no están en un dieléctrico.  $D = \epsilon E$
Energía del Campo Eléctrico	$\epsilon E^2$		“Corresponde con la energía elástica de las partículas deformadas. Esta energía tiene que ser igual al trabajo realizado para deformar las partículas: la fuerza ejercida por los vórtices, multiplicada por el desplazamiento de la sustancia”.  $ED = \epsilon E^2$  (Berkson, 1981 p. 193)

Éste cuadro organiza el trabajo hecho por Berkson (1981) sobre la relación que hay entre las magnitudes mecánicas y electromagnéticas.

#### 2.2.4. Consideraciones finales sobre el mecanismo y su funcionamiento.

Maxwell construye su mecanismo constriéndolo y condicionándolo para que represente los resultados experimentales con que contaba para la época, por ejemplo, representar la durabilidad de las líneas de fuerza que rodean a una fuente magnética: “Las líneas de fuerza que rodean una fuente magnética constante pueden existir por un tiempo indefinido” (Nersessian, 2008 p.37). Pero, el mecanismo a su vez, también es constreñido, modificado y condicionado por los recursos con que dispuso Maxwell. Lo cual significaba, que ese proceder lo llevó a ir modificando su conceptualización de la fenomenología. En este caso, explicar la durabilidad de las líneas de fuerza, lo llevó a asumir que: No hay pérdida de energía cuando las partículas circulares están girando en su lugar. La situación

planteada se explica por medio del mecanismo asumiendo que las partículas circulares no se deslizan ni se tocan cuando giran en su lugar (ibíd.).

Otro ejemplo de que Maxwell condiciona su mecanismo a los resultados experimentales, pero a su vez también éste es condicionado por los recursos, y que todo este proceder lleva a Maxwell a modificar su conceptualización sobre la fenomenología es la manera como explica el calor que se produce por la circulación de corrientes: en su mecanismo, la traslación de las partículas representa la circulación de una corriente eléctrica, pero las partículas al realizar este movimiento tendrían que experimentar un rozamiento con los vórtices, por lo tanto perderían energía. Esta pérdida de energía se representaría en el calor de los alambres (Nersessian, 2008).

En otro ejemplo del proceder de Maxwell, él establece la relación causal por medio de su mecanismo entre la corriente y las líneas de fuerza de la siguiente manera: El desplazamiento de las partículas como vimos representan la circulación de una corriente eléctrica. Supongamos sobre éste tipo de partículas de un conductor que se ejerce una fuerza eléctrica. Esta fuerza causa que las partículas se desplacen, pero así mismo, que también giren, supongamos que giran en la dirección de las manecillas del reloj. Ahora como las partículas se configuran entre filas de vórtices, entonces la rotación de las partículas produce que los vórtices empiecen a girar también, pero en dirección contraria de las partículas, es decir, en dirección contraria a las manecillas del reloj.

Aquí hay varias cosas para resaltar: primero, note que prima el movimiento de rotación de las partículas sobre los vórtices que el movimiento de traslación de las mismas sobre los vórtices. Segundo, la polaridad del magnetismo se determina por la dirección en la que giren los vórtices. Observe que en el ejemplo, los vórtices que están por debajo de las partículas en su parte superior girarían en dirección contraria al giro que tendrían en la parte inferior los vórtices que están por encima de las partículas. “Esta explicación captura la polaridad del magnetismo” (Nersessian, 2008 p. 41).

Ahora, analicemos un poco qué llevó a Maxwell a modificar su mecanismo mediante partículas circulares:

Suponiendo que sea correcta la explicación de las líneas de fuerza mediante vórtices moleculares, cabe preguntarse por qué una determinada distribución de vórtices supone una corriente eléctrica. Una respuesta satisfactoria nos facilitaría mucho el camino hacia la

resolución del verdadero problema, que no es sino contestar a la pregunta: ¿Qué es la corriente eléctrica? Me ha costado mucho aceptar la existencia de vórtices a través de todo un medio, girando codo con codo en la misma dirección en torno a ejes paralelos. Las porciones contiguas de dos vórtices consecutivos deben moverse en direcciones opuestas; y es difícil comprender cómo el movimiento de una parte del medio pueda coexistir con un movimiento contrario de la porción contigua e incluso producirlo. La única idea que me ha ayudado a concebir este tipo de movimiento es que los vórtices están separados por una capa de partículas girando cada una alrededor de su propio eje, en dirección opuesta a la de los vórtices, de forma que las superficies de contacto entre partículas y vórtices tienen el mismo sentido de movimiento (citado en Berkson, p. 187; Maxwell, 1861-1862 p. 468-9).

Observe que Maxwell inicia, primero, planteando como hipótesis que la idea de los vórtices moleculares es cierta. Luego y con base en esto se refiere a cómo mediante la distribución de vórtices (que son las entidades con que modela la manera en que se transmiten las acciones magnéticas) se puede suponer una corriente eléctrica. Esto quiere decir, que aceptando la veracidad de la hipótesis planteada, cómo se puede explicar que estas entidades guarden alguna relación dinámica con las corrientes eléctricas. Una respuesta a esta cuestión significaría explicar, por ejemplo, por qué se genera el fenómeno de inducción electromagnética.

Después de esto, Maxwell ya ubicado desde tal hipótesis, dice sutilmente que no es posible responder con su mecanismo a la situación planteada (relación corriente-magnetismo) debido al estado en el que éste se encuentra. De esta manera reconoce la complejidad de concebir que los vórtices puedan mantenerse girando uno contiguo de otro, si a la vez se están rozando sus superficies. Tenga en cuenta que de la mecánica sabemos que un movimiento de este tipo implicaría que los vórtices después de un tiempo detengan su movimiento como producto del rozamiento que hay entre ellos y por lo tanto, en el mecanismo esto significaría que las acciones magnéticas se transmitieran por un tiempo limitado, es decir, la configuración de las líneas de fuerza sólo existiría por un tiempo limitado. Pero, esta situación no se corresponde con la realidad.

Con base en esto, su mecanismo necesitaba ser modificado para establecer una relación dinámica entre la corriente eléctrica y el magnetismo. Como vimos, Maxwell respondió a su situación, por medio del constreñimiento de partículas eléctricas. *En mecánica, cuando se quiere que dos ruedas*

*giren en la misma dirección, se coloca entre ellas otra rueda que engrane con ambas, y que se llama piñón loco. La hipótesis que sugiero sobre los vórtices es que entre cada dos vórtices contiguos se interpone una capa de partículas que actúa como piñón loco; de esta forma cada vórtice tiende a hacer que sus vecinos se muevan en su misma dirección* (citado en Berkson, p. 187; Maxwell, 1861-1862 p. 468-9).

La explicación dada aquí sólo toma algunos constreñimientos de la fenomenología de la situación problemática de Maxwell, por lo tanto, no muestra la profundidad y el pleno alcance del mecanismo. Finalmente, se ha tomado este camino, por un lado, para ser pragmáticos con el desarrollo de la monografía. Por otro lado, porque la selección de los constreñimientos que se han abordado permiten cumplir con el objetivo planteado: conceptualizar sobre la noción de Campo EM que desarrolló Maxwell.

### 3. ANÁLISIS DE LA CONCEPTUALIZACIÓN.

Naturalmente se podría juzgar que el valor que tiene un proyecto de investigación (monografía) está determinado por el cumplimiento de los objetivos que se plantearon. En este sentido, esta monografía se planteó como objetivo conceptualizar sobre la noción de campo EM que Maxwell desarrolló. Se dijo que la conceptualización se iba a desarrollar mediante el análisis del proceso de creación y adaptación (modelación) que tuvo el mecanismo con que Maxwell llevó a cabo la elaboración de su teoría. Sin embargo, no se brindó una definición concreta sobre la noción de Campo EM, por lo tanto, se podría interpelar que tanto se cumplió con el objetivo planteado, es decir, qué valor tiene esta monografía.

Con base en lo desarrollado en esta monografía, una definición al respecto diría que; el Campo EM es ese espacio etéreo que ha sido modelado y configurado mediante dispositivos mecánicos donde ocurren los fenómenos eléctricos y magnéticos. Así mismo, el Campo EM queda caracterizado y descrito por algunas magnitudes “electromagnéticas”: E, D y H. Sin embargo, siendo rigurosos y precisos con lo que implica una conceptualización reconocemos que esta definición debería ser más sofisticada para enriquecer la conceptualización de dicha noción.

Cuando volvemos a la cuestión qué es un concepto, nos referimos al primer capítulo donde vimos una definición al respecto. Allí se dijo que los conceptos se fundan sobre tres conjuntos:  $C(S, I, \mathbb{R})$ , con base en la Teoría de los Campos Conceptuales de Gerard Vergnaud (1990). Desde ese marco teórico, lo que aquí se ha desarrollado contribuye en mayor medida al conjunto de los significantes  $[C(\mathbb{R})]$  de los que se compone el concepto de Campo EM, es decir, al “conjunto de las formas lingüísticas y no lingüísticas que permiten representar simbólicamente el concepto, sus propiedades, las situaciones y los procedimientos de tratamiento” (Vergnaud 1990, p.7). Así mismo, la comprensión de éste significante aporta elementos a la conceptualización. Por lo tanto, teniendo como referente la teoría de Vergnaud decimos que sí se ha respondido con el objetivo planteado por esta monografía.

Por otro lado, de acuerdo con White y Gunstone (1992), entender un concepto implica poseer un conocimiento desde seis posiciones diferentes<sup>14</sup>. Estas seis posiciones son los elementos del conjunto que componen la comprensión de un concepto. Lo importante aquí está en, primero, entender un concepto no significa tener una definición al respecto, porque “los conceptos se pueden entender sin

---

<sup>14</sup> Proposiciones, secuencias, imágenes, episodios y habilidades intelectuales y motoras (White, R. & Gunstone, R. 1992).

conocer la definición” (White & Gunstone, 1992 p. 5). Además, no todos los conceptos tienen una definición precisa y concreta. Segundo, comprender un concepto no significa que haya una única conceptualización porque un sujeto arbitrario puede conocer el concepto sólo desde alguna de las seis posiciones del conjunto de los que se compone la comprensión del concepto. De acuerdo con White y Gunstone (1992), la comprensión de un concepto implica un proceso multilíneal que se enriquece desde diferentes posiciones, pero que siempre puede estar siendo enriquecido, es decir, no hay una comprensión absoluta y completa sobre un concepto, sino que hay comprensiones en diferentes grados o niveles y desde diferentes aspectos, posiciones y escenarios (ibíd.).

Con esto queremos decir, que lo hecho aquí verdaderamente aporta a la conceptualización de la noción de Campo EM, lo hecho aquí abarca una conceptualización cualitativa del concepto de campo EM que desarrolló Maxwell, esta conceptualización lleva a comprender la dinámica de la fenomenología, pero así mismo, cómo se modela y explica esa fenomenología, cuáles son las variables que describen el Campo y con un poco de perspicacia permiten inferir cómo se puede describir matemáticamente el campo EM.

#### 4. REFERENCIAS

- Agazzi, E. (1978). *Temas y problemas de Filosofía de la Física*. Barcelona: Editorial Herder.
- Berkson, W. (1981). *Las teorías de los campos de fuerza: Desde Faraday hasta Einstein*. Madrid: Alianza Editorial.
- Duit, R. (2007). Science Education Research Internationally: Conceptions, research methods, Domains of Research. *Eurasia Journal of Mathematics Science & Technology Educations*, 3(1), 3-15.
- Hewitt, P. (2007). *Física conceptual*. Pearson, Addison Wesley.
- Llancaqueo, A., Caballero, M. C., & Moreira, M. A. (2003). El concepto de campo en el aprendizaje de la física y en la investigación en educación en ciencias. *Revista electrónica de enseñanza de las ciencias*, 2(3), 227-253.
- Maxwell, J. C. (1855-1856). On Faraday's lines of force. En *Scientific Papers* 1, 155-229, ed. W. D. Niven. Cambridge: Cambridge University Press.
- Maxwell, J. C. (1861-1862). On physical lines of force. En *Scientific Papers* 1, 451-513, ed. W. D. Niven. Cambridge: Cambridge University Press.
- Maxwell, J. C. (1864). A dynamical theory of the electromagnetic field. En *Scientific Papers* 1, 526-597, ed. W. D. Niven. Cambridge: Cambridge University Press.
- Moreira, M. A. (2002). Vergnaud's conceptual fields theory, science education, and research in this area. *Investigações em Ensino de Ciências*, 7(1), 7-29.
- Nersessian, N. J. (1992). "How do Scientist think? Capturing the dynamics of conceptual change in science." En *Minnesota Studies in the Philosophy of Science*. ed. R. Giere. Minneapolis: University of Minnesota Press.
- Nersessian, N. (2008). *Creating scientific concepts*. Cambridge, Massachusetts: The MIT press.
- Tipler, P. A. (1976). *Física Conceptual*. Editorial Reverté.
- UNESCO. (2005). ¿Cómo promover el interés por la cultura científica? Una propuesta didáctica fundamentada para la educación científica de jóvenes de 15 a 18 años. *Publicado por la Oficina Regional de Educación de la UNESCO para América Latina y el Caribe*.
- Velazco, S., & Salinas, J. (2001). Comprensión de los conceptos de campo, energía y potencial eléctricos y magnéticos en estudiantes universitarios. *Revista Brasileira de Ensino de Ciências*, 23 (3), 308-318.
- Vergnaud, G. (1990). La teoría de los campos conceptuales. En *Recherches en Didactique des Mathématiques*, 10 (2-3), 133-170.
- White, R. y Gunstone, R. (1992). *Probing Understanding*. USA: The Falmer Press.