



41061
14
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS

Una propuesta de enseñanza de la teoría
electromagnética de Maxwell, en el ciclo
profesional, con base en el constructivismo

Tesis
que para obtener el grado de
Maestría en Enseñanza Superior
Presenta

Fis. Román Tejada Castillo

Director de Tesis
Dr. Fernando Flores Camacho



México, D. F.

2003

A



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

A:

Edith: Siempre solidaria, siempre protectora.

Miranda: Siempre comprensiva, siempre amorosa.

Valeria: Siempre apasionada, siempre cariñosa.

AUTORIZO a la Dirección General de Bibliotecas •
UNAM a difundir en formato electrónico e impr.
contenido de mi trabajo recepciones
NOMBRE: Román Tejeda
Castillo
FECHA: 7 de Junio 2003
FIRMA: R. Tejeda

B

*No cesaremos de explorar
y el final de toda nuestra exploración
será llegar al punto de partida
y reconocer el lugar por primera vez.*

T. S. Eliott

ÍNDICE

	Página
Introducción	2
Capítulo 1.	
El Constructivismo. Sus implicaciones educativas.	6
Capítulo 2.	
La electricidad y el magnetismo previos a Maxwell.	13
Capítulo 3.	
Las ideas de Maxwell:	
a) La deducción de las leyes de campo electromagnético.	26
b) Consecuencias de la teoría de Maxwell.	45
c) Las ecuaciones de Maxwell en la actualidad.	56
Capítulo 4.	
Propuesta de enseñanza:	68
Capítulo 5.	
Conclusiones	124
Referencias.	135
Apéndice: Rasgos biográficos de Maxwell.	

Introducción.

Es muy difícil, quizá imposible, imaginarnos la vida moderna sin energía eléctrica. En casa, basta revisar nuestro entorno y encontraremos una enorme diversidad de aparatos que nos facilitan la vida: lámparas, teléfono, timbre, calefactor, radio, televisión, reproductor de discos musicales; si entramos a la cocina de la casa, encontraremos, por lo general, licuadora, batidora, horno de resistencia eléctrica, horno de microondas, refrigerador y un sinfín de dispositivos eléctricos. En la calle de la ciudad, veremos el alumbrado público, los transportes eléctricos (tranvía, trolebús o metro), automóviles y camiones (que, para funcionar usan la electricidad), semáforos, anuncios luminosos, etcétera.

Resultaría extenuante hacer un recuento, aun cuando fuera muy somero, de lo que representa la energía eléctrica para las fábricas o las oficinas ya que, a fin de cuentas, suponemos que "todo mundo" ha visto una gran diversidad de dispositivos eléctricos.

Sin embargo, no podemos dejar de mencionar la gran importancia que, para cualquier país, tiene el sistema integral de comunicaciones y el acceso a la información, sistema que se encuentra integrado por: la telefonía, telégrafo, radiofonia, televisión, radar, ferrocarriles, satélites de comunicación, redes de cómputo mediante las cuales funcionan los sistemas bancarios, financieros, hacendarios y otros muchos; todos estos elementos mencionados, funcionan con energía eléctrica.

Es entonces claro que, la sociedad tiene la necesidad de conocer la teoría electromagnética. Desde luego, no todos los que usamos la energía eléctrica, requerimos tener un conocimiento profundo de la física, existen diferentes grados de conocimiento que serán los convenientes para cada uno: como usuario, trabajador, técnico, ingeniero, diseñador, especialista, investigador y muchos más.

En los planes y programas de estudios de los establecimientos de educación superior: Escuelas, Institutos y Universidades, en las correspondientes áreas técnicas o científicas, la teoría electromagnética ocupa un lugar importante. En el caso particular de la UNAM, podemos mencionar que forma parte de los planes de estudios de las facultades de Ciencias, Ingeniería y Química, así como en las Facultades de Estudios Superiores de Acatlán y Cuautitlán.

El electromagnetismo es parte de los cursos teóricos de física y es fundamento obligado para las carreras de ingeniería en donde, en cursos posteriores, se estudia la teoría de circuitos y señales o bien, los fundamentos de radiotecnía, propagación de ondas, sistemas de señales, antenas de recepción, sistemas de alimentación, técnicas de alta frecuencia, sistemas de microondas, control remoto, teoría de autómatas, hornos de resistencia, hornos de inducción, resonancia magnética y muchas aplicaciones más.

En la época actual, es muy extenso el ámbito de las cuestiones que examina la teoría electromagnética y por ende, se ha complicado considerablemente la solución de los problemas prácticos.

Por todo lo anteriormente señalado, la teoría electromagnética es una asignatura (o un conjunto de ellas), de las más importantes en los currícula de las carreras científicas o técnicas e indudablemente, es una de las que presentan serias dificultades para su aprendizaje por parte de los estudiantes. Su comprensión requiere de abstracciones físicas y de conceptos matemáticos. Para poder

resolver problemas prácticos se requiere de una base considerable de conocimientos matemáticos. No se trata de una asignatura para la que sea fácil, en el nivel introductorio, el diseño y realización de prácticas de laboratorio, que hagan evidente o expliquen el comportamiento de los campos electromagnéticos variables en el tiempo y esto ocasiona que, generalmente, los estudiantes pretendan explicar las relaciones del campo, en términos de parámetros de relaciones entre circuitos, con los que han tenido contacto experimental. Puesto que una función importante de la teoría electromagnética es la de evaluar analíticamente los parámetros de elementos de circuitos y asignarles significados precisos a términos usuales como: "caída de voltaje", "voltaje inducido", "impedancia", "inductancia", "capacitancia", "reactancia", etc., se hace evidente la dificultad conceptual a la que se enfrentan los estudiantes antes de adquirir un entendimiento adecuado de la teoría electromagnética.

El proceso de enseñanza aprendizaje del electromagnetismo, no es eficiente. Los resultados que se obtienen en la actualidad, no son los deseados. Los problemas con los que se enfrenta el proceso son muchos y muy variados, sin embargo, esta problemática no es exclusiva del electromagnetismo. Es un fenómeno que ocurre, desde hace varias décadas, en la enseñanza de las ciencias en general. La comunidad científica interesada en la enseñanza de las ciencias, se ha abocado, en diferentes países y en diferentes épocas, a dar solución al problema, utilizando para el efecto diversos enfoques y como resultado de estas acciones, ha surgido un número considerable de posibles soluciones, que incluyen: Propuestas didácticas, nuevos planes y programas de estudios, estrategias didácticas diferentes a las tradicionales, nuevas organizaciones, etcétera. A cada conjunto de estas propuestas se les ha denominado de manera genérica como "proyectos", de los cuales, se pueden citar como ejemplos, entre otros muchos a:

Berkeley Physics Course and Laboratory, apoyado por la National Science Foundation, de los Estados Unidos de América, desarrollado en 1960 en la Universidad de California¹.

Physical Science Study Committee (PSSC)², también apoyado por la National Science Foundation, así como por varias firmas comerciales, desarrollado e implementado por el Instituto de Tecnología de Massachusetts, (M.I.T) en la década de los sesentas

Nuffield Science Teaching Project. Se desarrolla durante la década de los 60's en Inglaterra, con la colaboración del Scottish Education Department y la Association for Science Education³.

A partir de 1980, se han llevado a efecto varias reuniones de especialistas en educación, con el objetivo de replantear la enseñanza de las ciencias, abordando la problemática en prácticamente todos los niveles educativos, desde la educación básica hasta los estudios universitarios. De dichas reuniones, podemos citar:

- ❖ Thinking Physics for Teaching Conference
- ❖ Conference on the Introductory Physics Course
- ❖ The First International Conference On Undergraduated Physics Education.
- ❖ First European Conference on Physics Teaching in Engineering Education.

¹ Berkeley Physics Course and Laboratory. MacGraw Hill Co. USA. 1968..

² Physical Science Study Comitee. D.C. Heat and Company. Lexinton, Mass.1971

³ Nuffield Foundation. Longmans/Penguin Books, London 1967.

Como resultado de estos encuentros, han surgido nuevos proyectos educativos, por ejemplo:

- ❖ PEEL (Project for Enhancing Effective Learning) de la Universidad de Monash, Australia.
- ❖ CLIS (Children Learning In Science), de la Universidad de Leeds (Inglaterra)
- ❖ PLON (Physics Currículo Development Project), de los Países Bajos.
- ❖ IUPP de los Estados Unidos de América.

Estos proyectos han desembocado en la proposición de varios modelos de enseñanza, edición y publicación de un gran número de libros y artículos especializados así como la elaboración de programas de computadora, desarrollo de tecnologías para la enseñanza de las ciencias, material y equipo de laboratorio, etcétera.

Los resultados obtenidos mediante la puesta en ejecución de los proyectos que se mencionan, si bien han sido importantes dado que indudablemente representan un avance en el proceso de enseñanza de la ciencia, no son satisfactorios. La mayoría de los investigadores consideran que los beneficios logrados son magros. Como ejemplos documentales podemos citar, entre otros muchos, a Matthews, M⁴., quien en 1994 se refiere a “la crisis contemporánea de la enseñanza de las ciencias”, Gil Pérez⁵, en el mismo año menciona “el fracaso escolar” y Flores, F⁶., en el año 2000, cita varios de los problemas asociados con el aprendizaje de las ciencias y las “formas ineficaces de la enseñanza”.

En virtud de lo antes expuesto, es natural que nos preguntemos: ¿Cuál será entonces la mejor manera de enseñar la teoría electromagnética a nivel introductorio?

En esta tesis se hace una propuesta de enseñanza basada en el constructivismo, para un curso completo sobre teoría electromagnética a nivel universitario, cuyos objetivos principales son, por un lado, mejorar sensiblemente la construcción de la teoría de Maxwell, por parte de los estudiantes y por el otro, proponer a los docentes una alternativa viable para construir un método alternativo para la enseñanza, que de suyo, conlleva la ventaja de propiciar que el docente haga una revisión del método y las estrategias didácticas que emplea en la actualidad.

Para formular esta propuesta, se han revisado las principales teorías educativas que han sido puestas en práctica en la República Mexicana, a partir de la segunda mitad del siglo XX y hasta nuestros días. Particularmente se han revisado (y se informan) los resultados obtenidos en la enseñanza del electromagnetismo en las Facultades de Ciencias y Química, de la Universidad Nacional Autónoma de México.

La justificación del porque se ha decidido hacer esta propuesta en el marco teórico del constructivismo, se encuentra en la siguiente sección de esta tesis que se denomina “El constructivismo y sus implicaciones educativas”.

⁴ Matthews, M. *Historia y Epistemología de las Ciencias: La Aproximación Actual*. Enseñanza de las Ciencias. 1994, 12(2)

⁵ Pérez, G. *Diez años de investigación en didáctica de las ciencias: Realizaciones y Perspectivas*. Enseñanza de las Ciencias. Universidad de Valencia. España. 1994.

⁶ Flores, F. *La enseñanza de las Ciencias: Su Investigación y sus Enfoques*. Ethos Educativo. México 2000.

En virtud de que la propuesta de enseñanza plantea la creación de zonas de desarrollo próximo, para intervenir y coadyuvar en la solución de problemas de orden conceptual, será muy importante aprovechar la similitud entre los modelos explicativos de los estudiantes y los modelos históricos para tender puentes de comprensión de los fenómenos; es por ello que se ha incluido el capítulo 3 que se refiere a “La electricidad y el magnetismo previos a Maxwell” así como a “Las ideas de Maxwell”. La utilización de los contenidos de este capítulo permitirá al docente el desarrollo de algunos elementos pedagógicos que faciliten el cambio conceptual de los estudiantes.

La investigación de campo realizada, consistió en la puesta en ejecución de la propuesta didáctica, ante un grupo regular de estudiantes de la Facultad de Química de la UNAM, durante el semestre lectivo 2000/1, de la que se da información detallada en el capítulo 4 de este escrito.

Capítulo 1

Introducción.- Del conjunto de formas en que se ha dado la educación escolarizada en la República Mexicana, destacan, por el grado de generalización que alcanzaron y por el tiempo que han sido utilizadas, independientemente de haber sido consideradas o no, como "oficiales" por el gobierno del país o bien por ser las que contaban con la aprobación de las autoridades académicas de las instituciones de educación superior, las siguientes:

La educación que ahora se conoce como "tradición antigua" o bien como "modelo tradicional", que surge en el siglo XVII y prevalece con más o menos vigencia hasta nuestros días.

La educación "conductista" que surge a mediados del pasado siglo XX y que alcanzó su expresión más amplia y difundida en la década de los 70's.

Los resultados obtenidos por ambas tradiciones en lo que respecta a la enseñanza de las ciencias, están muy lejos de poder ser considerados como satisfactorios, originando una búsqueda de métodos de enseñanza más efectivos, es decir, formas de enseñanza que muestren ser más eficientes y eficaces.

Esta búsqueda ha propiciado la aparición de un numeroso conjunto de grupos de investigadores en educación, que han abordado el problema desde diferentes ángulos, con diferentes enfoques y naturalmente, con diversos marcos teóricos.

Una importante vertiente de estas investigaciones está formada por el conjunto de investigadores que consideran que el proceso de enseñanza y aprendizaje depende fundamentalmente de la actividad mental que realiza el sujeto que aprende y además descansa en el supuesto básico de que el conocimiento científico, lejos de poder ser transmitido, debe ser construido. Estas investigaciones han devenido en diversas concepciones, que reciben el denominativo genérico de "Constructivismo".

La propuesta que se hace en esta tesis, toma como referente teórico al constructivismo y en este primer capítulo se hace un recorrido breve por las tres formas o corrientes educativas que he mencionado, ubicando por lo tanto, los supuestos teóricos en los que descansan las hipótesis de trabajo y las decisiones que se tomaron en el desarrollo de la propuesta.

El Constructivismo: Sus implicaciones educativas.

Le Goff⁷: En el siglo XII existían tres clases sociales distinguidas por Aldaberon de Laón, citado por

- La clase que reza (los clérigos)
- La clase que protege (los nobles) y
- La clase que trabaja (los siervos)

⁷ Le Goff, J., *Los Intelectuales en la Edad Media*. Gedisa, Buenos Aires. 1985.

Cuando, perteneciendo a una clase, se realizaba una tarea específica, se podía tener un oficio, por ejemplo, si un siervo cultivaba la tierra, además de siervo era campesino; si un noble lo deseaba, podía ser soldado, propietario, juez o administrador. Los clérigos (particularmente los monjes) a menudo eran todas esas cosas y, a veces, eran sabios, profesores o escritores, pero todas esas actividades eran siempre secundarias a su personalidad de hombres de la iglesia.

Un hombre cuyo oficio (único) fuera escribir o enseñar o ambas cosas, un hombre que profesionalmente tuviera la actividad de profesor y de sabio, fue un hombre que sólo apareció cuando surgieron las ciudades.

La cita anterior, que narra cómo aparece, junto con las ciudades, en el siglo XII de nuestra era, el profesor (como una clase social), es incluida en esta tesis, para mencionar que, posiblemente, estos fueron los únicos docentes que no enunciaron frases como "La educación es mala", "La educación en el ciclo anterior es deficiente", "Los estudiantes acceden a este ciclo lectivo, sin haber comprendido el anterior", etcétera.

En 1994, afirmó Matthews⁸ ".... Dada la bien conocida crisis contemporánea de la enseñanza de las ciencias – reflejada en la huida del aula de ciencias tanto de profesores como de estudiantes, y en la alarmante cifra de analfabetismo científico- estas iniciativas son oportunas..." (refiriéndose a una iniciativa que pretendía incluir la historia y la filosofía a la enseñanza de las ciencias).

En 2000, escribe Flores⁹ "...En la actualidad, sin lugar a duda, uno de los problemas educativos más complejo y urgente de resolver es la enseñanza de la ciencia. Este reconocimiento proviene de todos los ámbitos escolares y se manifiesta, en su expresión más visible, en los pobres resultados que se logran con los estudiantes y que se ven reflejados en reprobación, deserción, falta de interés y sobre todo, en una visión de la ciencia y de los científicos deformada, alejada de la realidad....".

Que se hagan estas citas, de las que podemos encontrar un gran número, nos indica, que la clase social que surge en el siglo XII en la cultura occidental (los profesores), tiene un *ethos* que la impulsa pertinazmente, a buscar la perfección en su quehacer cotidiano, que no importa cuánto se logre, siempre existirá una insatisfacción con respecto a los resultados obtenidos.

Existe en la actualidad, un gran número de investigadores en educación, que buscan con tenacidad las formas o los métodos con que puede darse óptimamente, el proceso enseñanza-aprendizaje de las ciencias y, con base en esas investigaciones se puede señalar que cualquier investigación que se lleve a cabo en la actualidad, en ese campo de conocimientos, convergerá a tres vertientes principales en las que se ha desarrollado el proceso, mismas que a continuación se enuncian con brevedad:

a) La más antigua, que se fundamenta en la transmisión directa de conocimientos, en la cual, una institución (o un maestro), presenta un cuadro de objetivos o de contenidos, que habrán de irse abordando ordenada y sistemáticamente, por etapas definidas con anticipación. A este esquema se le denomina "programa de enseñanza" o "currículum".

⁸ Matthews, M., Obra citada. 1994.

⁹ Flores, F. (2000) Obra citada.

La "transmisión del conocimiento", se da entre un docente (que comúnmente conocemos como profesor, maestro, catedrático o mentor) y uno o varios estudiantes (a los que también denominamos, aprendices, alumnos o educandos). El docente es el depositario o poseedor de un saber y el alumno es considerado en esta tradición como "una hoja en blanco", en donde el docente escribirá lo que juzgue conveniente y para el efecto, todos los alumnos son iguales (tábula rasa). Podemos también hacer una analogía en la que el estudiante es un recipiente abierto, donde el profesor vierte un contenido de "conocimientos" que previamente fueron considerados adecuados para que el estudiante los reciba.

La forma de transmisión del conocimiento, generalmente es lineal entre el docente y el estudiante. El profesor hace exposiciones orales con alta tendencia hacia la ilustración y el alumno debe permanecer "receptivo" y atento. Para mostrar la retención de la información recibida, el estudiante deberá realizar un gran esfuerzo de memorización.

A esta pedagogía basada en el empirismo, en referencia a la educación escolarizada, podemos ubicarla históricamente en el siglo XVII¹⁰.

b) La segunda corriente puede ser ubicada en el tiempo, a mediados del siglo XX, basada fundamentalmente en el entrenamiento (que se aseguraba era un principio de aprendizaje). El "programa" consiste una serie de propuestas de "estímulo-respuesta" cuya validez descansa en las ideas de "condicionamiento operante" y "refuerzo".

El docente, en esta tradición, se comporta como "un entrenador", que tiene adicionalmente la capacidad de analizar los comportamientos de los estudiantes que muestran que se ha operado un cambio en su conducta y por tanto, se han "aprendido" los conocimientos, que previamente se determinó que eran los adecuados, los que necesariamente "debe poseer" el estudiante.

El alumno, en este modelo pedagógico, debe ser receptivo y estar atento a descubrir cuál es la respuesta que debe dar a cada estímulo, lo que no le resulta difícil puesto que, si responde lo que el profesor quiere, se le premia, en tanto que si responde lo que el profesor no quiere, se le castiga. Estos refuerzos (premios y castigos) generalmente son vía la certificación, es decir, si el alumno se comporta, según lo ha establecido el docente (o el programa), se le aprueba y en caso contrario se le reprueba.

Esta pedagogía, que descansa en las ideas del conductismo, cuyo representante más conspicuo fue Skinner¹¹, hunde sus raíces en los trabajos llevados a cabo por Pavlov¹² y Thorndike¹³ y originó además algunas derivaciones como fueron "La enseñanza programada", que dio como resultado un gran número de publicaciones que pretendían llevar al estudiante, sin el concurso de un profesor, a "una cadena de éxitos" pues el libro o la publicación sólo permitía al aprendiz pasar a un tema subsecuente si previamente había dado las respuestas consideradas como correctas, ejemplos de estas publicaciones, entre muchas otras, son:

¹⁰ Chateau, J. *Los Grandes Pedagogos*. Fondo de Cultura Económica. México. 2000.

¹¹ Skinner, B. *Science and Human Behaviour*. Mac Millan. New York. 1953

¹² Pavlov, I. *Reflejos condicionados e inhibiciones*. Peninsula. Barcelona. 1979

¹³ Thorndike, E. *Animal Intelligence: Experimental Studies*. Mac Millan New York. 1911.

- Joseph, A y Leahy, D. Programmed Physics, John Wiley & Sons, N.Y. 1965.
- The committee on educational media of the mathematical association of america. A programmed course in calculus. W. A. Benjamin, Inc. 1965. N.Y.
- Sacerdote, L. General Chemistry: A programmed review, John Wiley & Sons, Inc. 1968.

Con la aparición de las computadoras personales, esta idea de guiar al alumno en el estudio de cualquier tema, pasando obligadamente por estancos subsiguientes, mediante la respuesta "correcta", ha vuelto a tomar fuerza. Otra derivación del conductismo fue la Tecnología Educativa¹⁴, que mediante procesos similares a los usados en la industria, planea las actividades, las cantidades de materia prima, los productos, el tratamiento, los inventarios, etcétera.

c) La tercera corriente educativa entre otras causas, tiene un origen pragmático. Los investigadores trataban de comprender y explicar, por qué la enseñanza tradicional fuera esta antigua o conductista, obtenía resultados tan pobres. En referencia a la enseñanza de las ciencias, los resultados eran desalentadores, cada vez el ingreso de estudiantes a las carreras científicas era más reducido, el abandono de los alumnos inscritos era, también muy alto y el rendimiento didáctico era escaso, es decir, el saber adquirido y susceptible de ser movilizado por los alumnos, en comparación con el tiempo dedicado para su adquisición, era a todas luces débil y en muchos casos nulo, como lo publican por separado Matthews¹⁵ y Flores¹⁶. Además, existía un denominador común en el razonamiento de los estudiantes, "ideas equivocadas" o "conceptos erróneos" aparecían con regularidad, incluso en comunidades alejadas tanto geográfica como temporalmente y estas concepciones mostraban una gran resistencia a ser sustituidas o modificadas aun después de varios intentos, en diferentes situaciones de enseñanza con el mismo contenido^{17 18}. Las investigaciones llevadas a cabo han dado lugar a diferentes modelos que explican los procesos seguidos por los estudiantes para construir su conocimiento, los obstáculos que encuentran y cuales son las condiciones más favorables para que se dé el aprendizaje.

El factor común que agrupa a los diferentes modelos que reciben el nombre genérico de "constructivismo" es que todas ellas conciben al aprendizaje del alumno como resultado de una actividad mental que el sujeto realiza, es decir, el aprendizaje del estudiante de ninguna manera es "la respuesta" al "estímulo" que hace el profesor.

Si se acepta entonces, que el aprendizaje del educando no es el resultado directo de las acciones que para enseñar toma el profesor, resulta claro que habría que definir cuál es el papel que desempeña en el proceso el docente puesto que, para que ocurra un aprendizaje y se pueda atribuir éste a una enseñanza, se estaría en el caso poco probable en que existiera una afinidad entre la estructura mental de un estudiante y un profesor, lo que supone una buena cantidad de trabajo del primero y tanto dedicación como atención del segundo. Una manera de sintetizar esta forma de interacción entre

¹⁴ Zaki, C. Tecnología de la Educación. CECSA. México. 1977.

¹⁵ Matthews, M. (1994) Obra citada.

¹⁶ Flores, F. (2000) Obra Citada.

¹⁷ Greca, I y Moreira, M. (1998). Modelos mentales y aprendizaje de física en electricidad y magnetismo Enseñanza de las Ciencias 16(2), 289-303.

¹⁸ Thacker, B., Ganiel, U. y Boys, D., (1999) Macroscopic phenomena and microscopic processes: Student understanding of transient in direct current electric circuits. American Journal of Physics 67 (suppl.7) 25-31

profesor y estudiante, se encuentra en el modelo pedagógico de Novak y Ausubel¹⁹, (al que en estricto sentido, no podemos ubicar como constructivista) que se denomina "aprendizaje significativo". Los investigadores postulan que para que ocurra el proceso de enseñanza-aprendizaje, deben cumplirse cinco condiciones necesarias que podríamos resumir como: un estudiante que quiera aprender, un profesor que quiera enseñar, contenidos potencialmente significativos, contexto y evaluación.

Sin embargo, debe quedar claro que, para las corrientes constructivistas, la organización de un aprendizaje depende fundamental y casi exclusivamente, de la actividad mental del sujeto que aprende, entendiendo por aprender, el acto de pasar de una concepción previa a otra más pertinente, en relación con el contexto, de esta manera, al aprendizaje se le puede identificar como una capacidad de acción, que puede ser efectiva o simbólica, que puede manifestarse de manera material o verbalmente y que está ligada (la capacidad) con la existencia de esquemas mentales en el aprendiz²⁰. En breve, para que el estudiante aprenda o movilice un concepto, debe transformar su estructura mental. Su marco de cuestionamiento se reformula, sus referencias se amplían y sus aptitudes cambian, se puede afirmar que el estudiante ha llevado a cabo una reestructuración de sus ideas²¹. Esta concepción constructivista, es evidentemente contraria a la que prevalecía en las tradiciones pedagógicas antigua y conductista, en las cuales se consideraba que el aprendizaje de las ciencias era un proceso simple de acumulación de ideas.

La reestructuración de las ideas del estudiante, entendida como el paso de una concepción previa a otra más pertinente, otorga de facto una gran importancia a la concepciones previas de los alumnos. Algunos investigadores²², a la diferencia o distancia entre el pensamiento del alumno y el pensamiento científico "correcto", le denominaron "representaciones" o "esquemas mentales", otros educadores²³ les llamaron concepciones equivocadas. En la actualidad, se considera que esas representaciones o preconceptos intervienen significativamente en la identificación de la situación, en el cuestionamiento involucrado, en la información pertinente y por lo tanto, son elementos indispensables con los que cuenta el alumno para aprender; a través de las concepciones previas, el estudiante seleccionará las informaciones, les dará significado, las integrará a su estructura mental, es decir, aprenderá²⁴.

Desde el punto de vista psicológico, el proceso de aprendizaje y desarrollo de los seres humanos, es explicado por diversos conjuntos de supuestos, que pueden ser distintos y a veces hasta contradictorios, como ocurre con las concepciones de Piaget y Vigotsky, pero todos ellos coinciden en la importancia, que para el efecto, tiene la actividad mental constructiva de las personas, de ahí que todos estos conjuntos de principios o postulados, reciban el nombre genérico de "constructivismo". Coll²⁵ explica que el término presenta una gran polisemia y, al menos en educación, coexisten casi tantos constructivismos como teorías psicológicas del desarrollo y del aprendizaje.

Atendiendo exclusivamente, a la influencia que sobre la reflexión y la práctica educativa tienen, en la actualidad, las teorías globales del desarrollo o del aprendizaje, Coll distingue los siguientes "constructivismos":

¹⁹ Ausubel, D. Novak, J. & Hancsian H. *Psicología Educativa: Un punto de vista cognoscitivo*. Trillas. México. 1998

²⁰ Greca, I. (1998) Obra Citada.

²¹ Piaget, J. e Inhelder, B. *Psicología del Niño*. Buenos Aires Editor. Argentina. 1974.

²² Giordán, A. Y Vecchi, G. *Los Orígenes del Saber: De las Concepciones Personales a los Conceptos Científicos*. Diada. Madrid. 1988.

²³ Ausubel, D. Novak, J. & Hancsian H (1998) Obra Citada.

²⁴ Giordán, A. *Los Nuevos Modelos de Aprendizaje*. Educación 2001. Nº 25 México. 1997.

²⁵ Coll, C. *¿Qué es el Constructivismo?* Colección Magisterio Uno. Argentina. 1997

a) El que se inspira en la teoría genética de Piaget y la escuela de Ginebra.

b) El que se basa en los trabajos de Ausubel y que hunde sus raíces en la teoría del aprendizaje verbal significativo, la teoría de los organizadores previos y la teoría de la asimilación.

c) El constructivismo inspirado en la psicología cognitiva y más concretamente en las teorías de los esquemas, surgidas al amparo de los enfoques del proceso humano de la información.

d) El constructivismo inspirado en la teoría sociocultural del desarrollo y del aprendizaje enunciada por Vigotsky.

Desde otra perspectiva, explica Matthews²⁶ que el constructivismo puede identificarse como la epistemología dominante entre los pedagogos de las ciencias y lo identifica como articulado en los trabajos de Von Glasersfeld²⁷, Novak²⁸, Driver²⁹ y otros.

En los trabajos más recientes de Flores³⁰, se puede ubicar al constructivismo como un enfoque en el que confluyen tres aportaciones fundamentales:

- ❖ La teoría psicogenética de Piaget.
- ❖ La epistemología y el cognoscitvismo.
- ❖ La psicología sociocultural de Vigotsky

Explica Flores que este enfoque (el constructivismo), tiene como centro al sujeto y sus ideas previas y busca la eficacia en el proceso de enseñanza-aprendizaje y que las investigaciones llevadas a efecto muestran una diversidad de concepciones sobre los factores que influyen en el origen de las ideas previas de los estudiantes así como en las posibilidades de modificarlas, erradicarlas o fortalecerlas, dando lugar a subcampos de investigación, entre los que menciona:

- a) Historia y filosofía de la ciencia.
- b) Cambio conceptual.
- c) Historia y enseñanza de la ciencia.
- d) Modelos conceptuales.
- e) Influencia de las condiciones contextuales.

También señala Flores, que un aspecto que debería ser obvio y, sin embargo, pocas veces se enuncia de manera clara, es el que se refiere a los docentes, que en el caso de México, fueron formados, en su mayoría, por los métodos tradicionales, que Khun³¹ asocia con los periodos de "ciencia normal" e identifica con una enseñanza dogmática y centrada en el entrenamiento. Las concepciones epistemológicas sobre el conocimiento científico, de los docentes, son derivadas del

²⁶ Matthews, M. (1994) Obra Citada.

²⁷ Von Glasersfeld, E., *Constructivism in Education: A Constructivist Approach To Teaching* Laurens Erlbaum Associates Publishers. USA. 1995.

²⁸ Novak, (1977) Obra citada.

²⁹ Driver, R., Guesne, E. y Tiberghien, A. *Ideas científicas en la infancia y la adolescencia*. Morata, Madrid. 1989.

³⁰ Flores, F. (2000) Obra Citada.

³¹ Khun, T. *La Estructura de las Revoluciones Científicas*. F. C. E. México. 1971

empirismo ingenuo y por ello están estrechamente ligadas al juicio de comprobación, perdiendo así todo el valor histórico y constructivo.

Tenemos entonces un conjunto de ideas que sobre el proceso de enseñanza aprendizaje, inducen los modelos constructivistas:

El alumno no responde a los estímulos que el profesor haga, no es un recipiente en el que podamos verter los conocimientos, no recibe los conocimientos sino que los construye. Para construir su conocimiento, el alumno cuenta con saberes que puede movilizar, para cada etapa de su construcción, el estudiante hace adaptaciones sucesivas de su estructura cognitiva, modifica su marco conceptual, modifica su forma de interrogar y confronta la utilidad de lo aprendido con lo que poseía como conocimiento previo.

El profesor deberá procurar allegarse de los elementos que puedan interferir positivamente con la estructura cognitiva de los estudiantes, facilitándoles la construcción de su conocimiento, para lo cual, es recomendable que:

Realice una autocrítica de su método de enseñanza.

Haga una revisión cuidadosa de sus concepciones epistemológicas.

Lleve a cabo una revisión cuidadosa y crítica del programa de la asignatura.

Diseñe las estrategias didácticas que juzgue más convenientes para el curso.

Elabore los instrumentos indicadores de los aspectos relevantes del proceso de enseñanza-aprendizaje.

Asuma una actitud abierta a todas las ideas y propuestas tanto de los estudiantes como de sus pares o de la ciencia misma.

Abandone el papel de “catedrático” para convertirse en un “facilitador del aprendizaje”, cuya misión principal es la de fungir como mediador entre el conocimiento y el estudiante.

Busque los elementos que propicien que se desarrollen adecuadamente, las relaciones de los estudiantes con: sus compañeros, los profesores, su búsqueda personal y el conocimiento científico.

Procure, por todos los medios a su alcance, hacer que el estudiante se apropie del conocimiento, que “lo conquiste”, convencerlo de que *debe construir su conocimiento* y para lograrlo, es condición indispensable que el alumno cambie su relación con el conocimiento, que debe dejar de ser un “receptor pasivo” y convertirse en el actor principal de su propia formación.

Capítulo 2

Introducción.- El objetivo principal de esta tesis es hacer una propuesta de enseñanza de la teoría electromagnética de Maxwell, en el ciclo profesional. Como la propuesta se apoya en la historia del electromagnetismo y menciona algunas concepciones filosóficas de los científicos involucrados en el establecimiento de la teoría electromagnética, se hace imprescindible que, para ensayarla, el docente busque ubicar en el tiempo los conceptos y teorías que se aborden con los estudiantes, ubicar también los problemas, en el contexto científico, geográfico, social y cultural. En este capítulo se hace un recorrido cronológico breve, que recoge las aportaciones relevantes a la teoría electromagnética, desde sus orígenes hasta el momento en que Maxwell establece su teoría. En este recorrido histórico no sólo se incluyen los trabajos de los investigadores que apoyaron la teoría electromagnética de Maxwell sino también aquellos que presentaron teorías alternativas y en algunos casos, contrarias.

La electricidad y el magnetismo previos a Maxwell.

El conocimiento humano de los fenómenos eléctricos y magnéticos, se remonta a la época de Tales de Mileto, en el siglo VI. A. C. Según Hetch³², existen evidencias de que, en alguna cultura americana de hace 4000 años, asentada en la región que actualmente es Guatemala, se conocían los imanes, prueba de ello es la existencia de pequeñas figurillas antropomórficas, talladas en piedra, que fueron realizadas de manera tal que contienen en el ombligo un imán natural. Este conocimiento no puede considerarse científico, de conformidad con la concepción actual, sin embargo, nos refiere a la percepción humana del fenómeno.

Podemos ubicar el inicio del estudio formal de la electricidad y el magnetismo, a finales del siglo XVII, cuando William Gilbert, Médico de la Corte de Isabel I de Inglaterra, realizó sus estudios sobre electricidad y magnetismo, que culminaron con la publicación de su libro "De Magnete"³³. En esta obra, informó los resultados obtenidos durante más de 15 años de investigación teórica y experimental. Al analizar sus escritos, puede identificarse con claridad que las ideas de Gilbert estaban influidas por el pensamiento aristotélico, refiriéndonos a que el estagirita realizó observaciones puramente cualitativas y por sus convicciones tanto vitalistas como finalistas, frecuentemente trasladó las propiedades de la naturaleza orgánica a la inorgánica, además de que sobrestimó el alcance de sus deducciones lógicas. La concepción actual de la investigación científica acepta el valor del método inductivo-deductivo, pero resulta claro que cuando la aplicación del método carece de evidencia experimental, se reduce a una mera dialéctica de la prueba, que difícilmente conduce a verdaderos hallazgos.

Aun cuando estuvo fuertemente influido por Aristóteles, Gilbert sí realizó una serie de experimentos, pero a lo largo de su libro encontramos incontables frases y aun párrafos que se refieren, por ejemplo, a la *forma* que debe agregarse a la *materia* para "construir" la *naturaleza* de los objetos, habla de la pérdida o ganancia de la *verticidad* de una parte de la tierra. Refiriéndose al hierro dice que éste adquiere verticidad al ponerlo en presencia de un imán, o bien, afirma que la fuerza magnética de la tierra, proviene de su *prima forma* (libro II), refiere en su libro V, la *formata anima* del agua y del aire.

³² Hetch, E. *Física en Perspectiva*. Addison Wesley Iberoamericana. México. 1987

³³ Gilbert, W. *De Magnete*. Dover. New York. 1958.

No debe quedar la impresión de que se valoran en poco las aportaciones de Gilbert al estudio de la electricidad y el magnetismo, por el contrario, su obra es un claro ejemplo de filosofía inductiva, que precedió e inspiró trabajos como el de Bacon³⁴ o los de Galileo³⁵ y Humboldt³⁶.

Para los propósitos de esta tesis, resultan significativamente importantes las aportaciones de Gilbert, que se refieren a reconocer que la inducción confiere al hierro magnetismo permanente, Gilbert encuentra que el magnetismo del hierro se pierde por calentamiento y comprueba que la masa de una barra de hierro permanece constante aun cuando dicha barra sea magnetizada, identifica que todos los imanes poseen dos polos y hace estudios sobre el magnetismo terrestre. En los trabajos de Gilbert identificamos la búsqueda del "asiento" de la fuerza magnética, cuando afirma que ésta no sólo se encuentra "dentro" del imán sino en el espacio que lo rodea, lo define como "*un conjunto de emanaciones invisibles*" que por lo tanto constituyen una "*orbis virtutis*" (esta pudiera ser una primera declaración de la existencia del campo magnético). Investiga el descubrimiento de Tales de Mileto sobre los efectos eléctricos que presentaban algunos cuerpos después de haber sido frotados, comprobó que no sólo se obtenía la electricidad frotando ámbar sino que también, frotando vidrio, azufre, sal, resinas y alumbre. Construyó un electroscopio (que llamó *versorium*), mismo que consistía de una aguja metálica muy liviana sostenida por su centro mediante un pivote muy afilado, la aguja giraba al acercarle una barra de ámbar previamente frotada. Gilbert encontró que sus experimentos sobre electricidad se veían afectados fuertemente por la humedad del ambiente.

Newton³⁷ (1642-1727), estableció que la "fuerza" de un imán, en un punto cualquiera del espacio, varía inversamente con el cubo de la distancia del imán al punto en cuestión, esta afirmación desde luego era equivocada, el dato sólo se proporciona como una muestra del pensamiento que prevalecía al respecto, a finales del siglo XVII.

En esa misma época (1672), Otto Von Guericke (1602-1686) construyó un instrumento, que consistía, fundamentalmente, de una esfera de azufre, que al ser puesta a girar mientras se le frotaba, adquiría carga eléctrica³⁸, este dispositivo constituyó el primer generador de carga electrostática, su importancia radicaba en que, mediante su uso, por primera vez se podían obtener cargas electrostáticas muy grandes.

Durante el siglo XVII, la comunidad científica, con algunas excepciones, mostró poco interés en estudiar los fenómenos eléctricos y magnéticos, de hecho, la mayoría de las aportaciones experimentales sólo se reducían al diseño de algunos dispositivos que estaban relacionados con la electricidad o el magnetismo, pero con fines de entretenimiento. El desarrollo significativo habría de darse en el siglo siguiente.

³⁴ Bacon, F. *Del Adelanto y Progreso de la Ciencia Divina y Humana*. Juan Pablos Editor. México 1984.

³⁵ Fermi, L. y Bernardini, G. *¿Qué ha dicho verdaderamente Galileo?*. Doncel, Madrid. 1971. Relatan los autores que cuando Galileo leyó el libro "De Magnete", manifestó gran interés por los conceptos de Gilbert, repitió los experimentos planteados y en sus "Diálogos" escribió:.... "Mi admiración, alabanza y envidia de este autor, es grande, por habersele ocurrido concepto tan espléndido sobre algo manejado por tantos sublimes ingenios y nunca advertido por ninguno....."

³⁶ Humboldt, A. *Cosmos: A sketch of the physical description of the universe*. Vol. I. The Johns Hopkins University Press. London 1997.

³⁷ Newton, I. *Principios Matemáticos de la Filosofía Natural y su Sistema del Mundo*. Editora Nacional. Madrid. 1982.

³⁸ Arons, A. *Evolución de los Conceptos de la Física*. Trillas. México. 1970.

En el siglo XVIII, Benjamin Franklin (1706-1790) contribuyó notablemente al desarrollo de la electricidad, con anterioridad a él, Francis Cisternay Dufay (1698-1739), publicó en 1734³⁹

"HAY DOS CLASES DIFERENTES DE ELECTRICIDAD, MUY DISTINTAS ENTRE SÍ: UNA QUE LLAMO ELECTRICIDAD VÍTREA Y OTRA RESINOSA. LA PRIMERA ES LA DEL VIDRIO, CRISTAL DE ROCA, PIEDRAS PRECIOSAS, PELO DE ANIMALES, LANA Y MUCHAS OTRAS SUSTANCIAS; LA SEGUNDA ES LA DEL ÁMBAR, GOMA LACA, SEDA, HILO, PAPEL Y OTROS CUERPOS. LA CARACTERÍSTICA DE AMBAS ELECTRICIDADES ES QUE UN CUERPO CARGADO CON ELECTRICIDAD VÍTREA REPELE A TODOS LOS DEMÁS CARGADOS CON LA MISMA ELECTRICIDAD Y, POR EL CONTRARIO, ATRAE A LOS QUE POSEEN ELECTRICIDAD RESINOSA".

Esta concepción hizo pensar a la mayoría de los científicos de la época, en la existencia de dos fluidos eléctricos que, al estar mezclados en cantidades iguales en un cuerpo, determinarían el estado neutro; al frotar los cuerpos, se alteraba la relación cuantitativa de las cargas, provocando el predominio de una de ellas. Franklin postuló que una cierta cantidad de un único fluido determinaría el estado neutro del cuerpo, un exceso o un defecto de dicho fluido, produciría electricidades de distinta clase. A esta proposición se le conoció como la "teoría de un solo fluido"⁴⁰, realizó también, un conjunto de experimentos, en su mayoría, de carácter cualitativo, pero que revistieron gran importancia. Asimismo, Franklin estableció que, existen dos tipos de carga, a las que les da el nombre que aun conservan, *positiva y negativa*⁴¹, estableció que los cuerpos pueden cargarse por tres métodos: frotamiento, contacto e inducción y además, demostró que "*cargas del mismo signo, se repelen, en tanto que cargas de signos contrarios se atraen*". Con sus experimentos relativos a la electricidad de las tormentas, Franklin encontró una analogía entre los rayos y las descargas eléctricas obtenidas por medio de la botella de Leyden. Inventó el pararrayos aun cuando, erróneamente, pensaba que las nubes estaban cargadas positivamente⁴².

La primera información cuantitativa relacionada con la interacción entre cargas eléctricas, fue aportada por Charles Augustin Coulomb (1736-1806), quien publicó en 1784 ante l'*Académie Royale des Sciences* un escrito en el que informó el desarrollo de un dispositivo experimental (la balanza de torsión)⁴³ mediante el cual podían medirse, con gran precisión, fuerzas de magnitud muy pequeña. Coulomb encontró primero, la relación que existía entre la torca aplicada a un filamento metálico y la deformación elástica que experimentaba (constante de torsión), explicó que la constante de proporcionalidad entre la torca aplicada y la deformación producida, dependía del material empleado. Con este conocimiento y usando la balanza de torsión, calculó el coeficiente de fricción entre un sólido y un fluido, así como la magnitud de la fuerza de interacción entre cuerpos cargados eléctricamente (cuerpos muy pequeños en comparación con la distancia que los separa). Con este experimento, postuló la ley de interacción entre partículas cargadas, que establecía que la fuerza de interacción: cumple la tercera ley de Newton, es proporcional al producto de la magnitud de las cargas y varía como el inverso del cuadrado de la distancia de separación entre ellas⁴⁴.

³⁹ Dufay, F., *Philosophical Transactions*. Vol. 38, 1734.

⁴⁰ En la actualidad consideramos que existen dos tipos de carga (positiva y negativa), pero que en los conductores metálicos sólo se mueven las cargas negativas (portadas por los electrones), que es coincidente con la teoría de Franklin.

⁴¹ Estas mismas son a las que Dufay propone que se denominen electricidad "resinosa" y electricidad "vítrea", respectivamente.

⁴² Papp, D., *Historia de la Física*. Espasa Calpe. Madrid. 1961

⁴³ En el mismo año de 1784, el Reverendo John Michell, en Inglaterra, también inventó una balanza de torsión, muy similar a la de Coulomb, que fue usada con posterioridad por Henry Cavendish, para medir la masa de la tierra. (este es uno de los muchos casos en que, dos investigadores arriban de manera independiente al mismo concepto).

⁴⁴ Daniel Bernoulli (1700-1782), probó con antelación a Coulomb, que las interacciones eléctricas son inversamente proporcionales al cuadrado de la distancia de separación entre las cargas. Citado en Jeans, J. *The Mathematical Theory of Electricity and Magnetism*. The Syndics of the Cambridge University Press. London. 1966

Coulomb realizó sus experimentos con la concepción de que existen dos fluidos eléctricos, el positivo y el negativo, identificó a la carga en un cuerpo, como el exceso de cualquiera de estos fluidos y, de esta manera, clasificó a los materiales conductores como los que permiten el paso libre de los fluidos, en tanto que los aislantes son los materiales que impiden el paso de los fluidos⁴⁵. Por extensión de estas ideas, Coulomb intentó desarrollar una teoría del magnetismo, que también fuera consistente con la mecánica de Newton. Postuló la existencia de dos fluidos magnéticos a los que llamó *norte* y *sur*, formados por “partículas magnéticas”, que obedecían, para sus interacciones, la ley de inverso cuadrado de Newton, pero se distinguían de los fluidos eléctricos en que no podían separarse (interactuar) a gran distancia.

Poisson (1781-1840), hizo en los años 1812 y 1824, desarrollos matemáticos⁴⁶, correspondientes a las teorías sobre electricidad y magnetismo de Coulomb. Con respecto a la fuerza entre las cargas, estableció matemáticamente, el concepto de potencial electrostático con el que se puede, dada una configuración de cargas, establecer el potencial en cualquier punto o inversamente, conocido el potencial, se puede encontrar la distribución de cargas que lo produce. El desarrollo matemático hecho por Poisson fue correcto, pero no completo, pues no consideró el caso de la electricidad dinámica (corrientes).

Los trabajos de Poisson sobre el magnetismo, aceptando la existencia de las “partículas magnéticas” postuladas por Coulomb, lo llevaban a unas predicciones cuyos resultados eran manifiestamente diferentes a los obtenidos mediante experimentación, en particular, la estimación de los valores de permeabilidad magnética, para algunos tipos comunes de hierro, podrían juzgarse de disparatados.

Luigi Galvani (1737-1798), publicó en 1791⁴⁷ sus investigaciones sobre “electricidad animal”. En el año 1780, sus ayudantes le hicieron notar que las patas de las ranas se contraían al tocar los nervios crurales con un bisturí, mientras una máquina eléctrica producía chispas en las cercanías. Galvani averiguó que la contracción sólo se producía si durante las descargas de la máquina, las extremidades de un nervio y de un músculo estaban unidas mediante un metal conductor. Sus observaciones lo llevaron a concluir que la condición de ocurrencia del fenómeno, era un arco conductor formado por dos metales y unidos en sus extremidades, con el nervio y el músculo de la rana, cerrando un circuito. Galvani creía haber encontrado una analogía entre las ranas y los peces eléctricos, afirmaba que la electricidad se encontraba en los nervios y músculos de los batracios, sin embargo, posteriormente realizó los mismos experimentos con otros tejidos naturales y encontró el mismo fenómeno, manifestando entonces, haber descubierto la “electricidad animal”.

Alessandro Volta (1745-1827), reprodujo los experimentos de Galvani y encontró que los nervios de las ranas, no eran necesarios para la manifestación de la electricidad, bastaban dos metales y cualquier músculo, mismo que después sustituyó por cuero, papel o trapos mojados (invención de la pila eléctrica). Con la pila de Volta podemos identificar el inicio del estudio de la electricidad dinámica⁴⁸.

⁴⁵ La distinción de cuerpos conductores y no conductores (aislantes), fue hecha por el inglés Gray (1696-1736), mismos que fueron identificados por Gilbert como cuerpos eléctricos y no eléctricos. El francés Desaguliers fue quien hizo notar que Gray y Gilbert se referían al mismo fenómeno y fue Dufay quien estableció con propiedad tanto el concepto de conductividad como el que existan cargas diferentes (en signo).

⁴⁶ Jeans, J. (1966) *Obra Citada*.

⁴⁷ Citado en Arons, A. *Evolución de los Conceptos de la Física*. Trillas. México. 1970.

⁴⁸ Arons, A. (1970) *Obra Citada*.

En el año de 1800, cuando aparece la publicación de los trabajos de Volta, William Nicholson (1753-1815) y A. Carlisle (1768-1840), trabajando con una pila de Volta, de 17 elementos, realizaron la electrólisis del agua. Este experimento fue también realizado por Ritter (1777-1810) y con posterioridad (en 1802), Humphry Davy (1778-1829) reprodujo el mismo experimento, pero estableció la relación volumétrica entre el oxígeno y el hidrógeno que se obtenía al descomponer el agua. Davy, en el año de 1808, llevó a efecto la descomposición de la potasa cáustica (hidróxido de potasio), obteniendo oxígeno y potasio. Bajo el mismo diseño experimental, logró obtener sodio, bario, calcio y estroncio. Davy fue quien propuso darle el nombre de Volta a la descarga eléctrica que obtuvo de una gran pila, la denominó "arco voltaico". Con base en los resultados obtenidos, Davy afirmaba que, en la naturaleza sólo había un tipo de fuerza; que las fuerzas eléctricas y las fuerzas de los enlaces químicos, eran las mismas. Clasificó, en una tabla, a los metales como conductores (del mejor al peor), percibió que entre la corriente eléctrica y la elevación de la temperatura de los conductores, existía una relación, pero no logró establecerla⁴⁹.

Conviene a nuestros propósitos, hacer en este momento un alto en la descripción cronológica del estudio de la electricidad y magnetismo, con el objetivo de establecer la situación problemática a la que se enfrentaron los investigadores del siglo XIX.

Uno de los mayores logros en física, que sirvió para sintetizar un gran cuerpo de conocimientos, fue realizado en la segunda mitad del siglo XVII, cuando Isaac Newton publicó sus famosos *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (5 de julio 1686), en los cuales unificó, en términos de unas pocas leyes, todo lo que en ese tiempo era conocido en lo concerniente a la dinámica⁵⁰. Sin embargo, acerca de la naturaleza de la luz, electricidad y magnetismo era muy poco lo que se conocía en esa época. Como se ha asentado en páginas anteriores, se habían realizado algunos trabajos por Dufay, Gilbert, Franklin, Galvani, Volta y otros. Pero, no se había establecido ninguna conexión entre la electricidad, el magnetismo y la luz.

La obra de Newton, considerada en conjunto con las aportaciones, importantes en grado superlativo, de Galileo (1564-1642) y Huygens (1629-1695), incorporó tal riqueza al conocimiento de la física que, después de su publicación, hubo de pasar un largo tiempo para que ocurrieran logros similares. El siglo XVIII prácticamente transcurre bajo el dominio de las ideas físicas (y filosóficas) de Newton. Las décadas inmediatas a su muerte, fueron de intensa labor, se estudió el calor, la electricidad, la acústica y en un largo periodo de lo que Khun⁵¹ denomina ciencia normal, gran parte de los científicos se dedicaron a dar coherencia tanto interna como externa, a la teoría de Newton. La teoría de Newton se había establecido como un paradigma.

El empleo del análisis matemático, en el tratamiento de problemas de la física, fue rasgo sobresaliente de la época posnewtoniana, que recibió las aportaciones de matemáticos notables, entre los que destacaron: Euler (1707-1783), Bernoulli (1700-1782), Lagrange (1736-1813), Laplace (1749-1827) y D'Alembert (1717-1783). Los desarrollos, de validez inobjetable en el campo de la física, logrados por Lagrange (mecánica analítica) y Laplace (mecánica celeste), alcanzaron un prestigio tal entre la comunidad científica, que habría de transcurrir más de un siglo para que se realizaran investigaciones que dejaran de considerar que los *puntos materiales* en su movimiento, habrían de

⁴⁹ Papp, D. (1961). Obra Citada

⁵⁰ Newton, I. (1982). Obra Citada.

⁵¹ Khun, T. (1971) Obra Citada

obedecer las leyes de la mecánica de Newton y, con base en ellos, explicar casi todos los fenómenos naturales.

El éxito logrado por Newton con su teoría mecánica, parece explicar su inclinación por adoptar el concepto corpuscular de la luz. Las bases de su teoría mecánica, le proporcionaban la posibilidad de considerar fuerzas entre sus *partículas de luz* y la materia ordinaria. En el año 1704, publicó su libro *Óptica*, en el que se evidenciaba que, al igual que Descartes, no pretendió ser específico en cuanto a la naturaleza de sus partículas de luz, nunca incidió en aspectos tales como la forma o el tamaño de los corpúsculos, en tanto que si les asoció algunas propiedades tales como elasticidad y velocidad de propagación, que resultaban necesarias para explicar su modelo,

El modelo corpuscular de la luz de Newton predice, con corrección, la ley de reflexión y postula una ley de refracción que, matemáticamente, tiene forma similar a ley de Snell, sin embargo, no es capaz de explicar la ocurrencia de reflexión y refracción que ocurren simultáneamente, en las interfases de medios transparentes.

Una teoría alternativa a la de Newton, fue el modelo ondulatorio de la luz, que apoyaban, entre otros, Huygens (1629-1695) y Hooke (1635-1703).

La publicación de Huygens, en 1678, de su *Tratado Sobre la Luz*, postuló la existencia de un *éter*, formado por partículas capaces de interactuar unas con otras y que hacía posible la propagación de las ondas. Hizo un modelo mecánico y un conjunto de consideraciones geométricas, que le permitieron construir frentes de onda a partir de frentes antecedentes, esta construcción geométrica es conocida en la actualidad como *construcción de Huygens*⁵².

Tanto el modelo corpuscular como el ondulatorio, postulaban la misma ley de reflexión y formas matemáticas similares para la refracción. Sin embargo, la teoría ondulatoria predecía, velocidades diferentes de la luz en diferentes medios.

Esta situación problemática motivó a muchos científicos a realizar experimentos que confirmaran una u otra teoría; sólo se mencionarán a continuación, aquellos que incidieron de manera directa en el desarrollo del electromagnetismo.

Thomas Young (1773-1829), realizó un experimento que consistía en practicar dos pequeñas perforaciones en un pantalla negra y observar a través de ellas, un punto luminoso, demostrando que, observando por las dos perforaciones se puede percibir menos iluminación que usando cada una de ellas por separado, Young identificó al fenómeno como similar al que ocurre con dos ondas generadas en el agua. A la explicación del fenómeno le denominó *ley general de la interferencia de la luz*⁵³.

Etienne Louis Malus (1775-1812), tratando de dar respuesta positiva a la convocatoria lanzada por la Academia Francesa de la Ciencia, con respecto a la creación de una teoría que explicara la doble refracción que sufren los rayos luminosos al cruzar algunos cristales, experimentó con cristales de espato calizo. Bajo diferentes condiciones experimentales, Malus pudo obtener una sola imagen de un objeto, u obtener dos, en cuyo caso, notó que siempre tenían intensidades luminosas

⁵² Cabrera, J. *Introducción a la Física Teórica. Vol. II*. Librería General. España. 1958.

⁵³ Papp, D. (1961) Obra Citada.

diferentes y que el máximo de una, coincidía con el mínimo de otra. Malus enfocó un punto brillante a través de un cristal, el cual se separó en dos rayos refractados, interceptó uno de los rayos y observó al otro mediante un segundo cristal, que cuando lo hacía girar, veía aparecer y desaparecer sucesivamente a los dos rayos refractados, cuya intensidad era complementaria. A las posiciones en donde el rayo era máximo, Malus las denominó *polos* y por ende, al fenómeno le llamó *polarización de la luz*⁵⁴.

Augustin Fresnell (1778-1827) realizó experimentos sobre el fenómeno "inflexión de la luz en los bordes de objetos opacos" (difracción), así como la reflexión de la luz. Explicó con claridad ambos fenómenos desde el punto de vista de la teoría ondulatoria y concluyó que la velocidad de la luz era inferior en el agua y en el vidrio, a la que mostraba en el aire. Mediante un dispositivo formado fundamentalmente por espejos planos formando un ángulo de casi 180°, mostró un patrón de interferencia. Trabajando con luz polarizada, descubrió que las ondas luminosas, son ondas transversales⁵⁵.

Pese a los éxitos logrados por Fresnell, no todos los científicos aceptaban que las ondas luminosas fueran ondas transversales. Uno de los argumentos en contra era el siguiente: Para que las ondas transversales se propaguen, es necesario un medio material que posea inercia y elasticidad. Cálculos realizados por Lord Kelvin mostraban que la rigidez del éter postulado por Fresnell debería ser mayor a la del acero, para permitir el paso de las ondas luminosas. Estos cálculos se basaban en el hecho conocido de que el cociente del coeficiente de elasticidad del medio entre el valor de su densidad, es proporcional al cuadrado de la velocidad de las ondas que se propagan en dicho medio.

El considerar un medio en el cual se desplazan las ondas luminosas (el éter luminífero), no sólo cuestionaba la teoría óptica de Newton, sino su teoría de la gravitación.

La situación así planteada puede identificarse, con lo que Kuhn⁵⁶ denomina, revoluciones científicas, a las que identifica como "aquellos episodios de desarrollos no acumulativos, en los que un paradigma nuevo reemplaza (total o parcialmente) a otro y es incompatible con el reemplazado", que se inician cuando una fracción de una comunidad científica, percibe que el paradigma vigente ha dejado de funcionar adecuadamente en la solución de los enigmas que ese paradigma había originado, causando que las diversas facciones apoyen a uno u otro paradigma, los cuales resultan incompatibles.

Este periodo de crisis originó la realización de investigaciones de tipo no-ordinaria y que los científicos de la época se abocaran hacia el análisis filosófico, como instrumento para resolver los enigmas existentes en el campo de conocimientos.

Michael Faraday desempeñó un papel fundamental en esta crisis, pues con sus aportaciones tanto físicas como filosóficas, estableció las bases de lo que hoy conocemos como Teoría de Campos

Influyeron de manera sobresaliente, en las concepciones científicas de Faraday, las investigaciones llevadas a cabo por Hans Christian Oersted (1777-1851) y André-Marie Ampère (1775-1836). A continuación se incluyen datos personales y la descripción de algunos trabajos realizados por estos científicos ya que son relevantes para nuestro estudio.

⁵⁴ Arons, A. (1970.). Obra Citada

⁵⁵ Cabrera, J. (1958). Obra Citada.

⁵⁶ Kuhn, T. (1971). Obra Citada

En el año de 1799, Oersted recibió su grado de doctor en filosofía, con una tesis sobre metafísica, hizo su primera publicación, con el título "*Recherches sur l'identité des forces électriques et chimiques*" con base en la cual, con posterioridad, Jöns Jakob Berzelius (1779-1848) desarrolló la electroquímica. El 21 de julio de 1820, en un panfleto que se distribuía entre los miembros de las sociedades científicas, Oersted publicó un trabajo titulado "*Experimenta circa effectum conflictus electricitatis in acum magneticam*". En dicha publicación, informó haber descubierto que la corriente eléctrica producía efectos observables en una aguja magnética⁵⁷. El descubrimiento revistió gran importancia dado que, establecía la posibilidad de interacción entre cuerpos, que ejercían fuerzas de naturaleza y origen distintos (eléctricas y magnéticas), más aun, la interacción entre la aguja magnética y la corriente eléctrica, se comportaba de manera distinta a la esperada por la teoría de Newton, que establecía que las fuerzas entre partículas actuaban en dirección de la línea recta que separa a dichas partículas, lo que no ocurría con los resultados obtenidos por Oersted.

Francois Arago (1786-1853), quien demostró que una corriente eléctrica podía imanar al hierro (invención del electroimán), informó a la Academia Francesa del experimento realizado por Oersted⁵⁸.

André-Marie Ampère, al conocer los resultados obtenidos por Oersted, pretendió explicarlos con las reglas y el método de la teoría de Newton. Ampère pensaba que sólo podían existir interacciones entre fenómenos de la misma naturaleza (y los eléctricos y magnéticos, eran considerados de distinta naturaleza), por lo cual supuso, que los efectos magnéticos, eran producidos por corrientes eléctricas dentro de los imanes, lo que reducía al fenómeno, a interacción entre corrientes eléctricas (las de los imanes y las voltaicas)⁵⁹.

Ampère realizó experimentos con el objetivo de establecer una teoría acorde con la newtoniana, que diera cuenta de las interacciones entre corrientes, para el efecto hizo un constructo mental *los elementos diferenciales de corriente*, los cuales serían el análogo de las masas puntuales de Newton, con los cuales esperaba demostrar que las interacciones (atracción o repulsión), se ejercían a lo largo de la línea de unión entre ellos, demostrando que las fuerzas eran, como las que postulaba Newton.

Descubrió, que: *Dos corrientes eléctricas paralelas se atraen si circulan en el mismo sentido y se repelen en caso contrario*. Descubrió también, que si un alambre por el que pasaba una corriente permanecía fijo, en tanto que otro alambre por el que también pasaba una corriente, era libre de girar en torno a una línea perpendicular a ambos alambres, en el caso de corrientes de sentido contrario, el alambre libre giraba hasta que las corrientes en ambos alambres fueran paralelas y circularan en el mismo sentido. Demostró, asimismo, que dos arrollamientos en espiral (bobinas), por los que circularan corrientes eléctricas, se comportaban como si fueran imanes, en lo que respecta a las atracciones y repulsiones.

En conclusión: Los experimentos de Ampère, importantes *per se*, tuvieron, en su época, matices contradictorios. Si bien logró hacer explícita la interacción entre corrientes, establecer la analogía de comportamientos entre las bobinas y los imanes, dar una explicación a las rotaciones de

⁵⁷ Shamos, M. *Great Experiments in Physics*. Holt, Rinehart and Winston. USA. 1959.

⁵⁸ Arons, A. (1970.) Obra Citada.

⁵⁹ Berkson, W. *Las Teorías de los Campos de Fuerza*. Alianza Universidad, Madrid. 1985.

corrientes, no logró (como era su propósito) interpretar adecuadamente sus experimentos, desde la lógica de la teoría de Newton. Sus elementos de corriente interactuaban de conformidad con la regla del inverso cuadrado, las fuerzas dependían de las intensidades de los elementos de corriente, pero había que considerar el ángulo que formaban las tangentes a las direcciones de las corrientes. Además, sus experimentos sólo podían considerar corrientes cerradas y nunca logró hacerlos para corrientes abiertas. Una corriente "abierta" se lograba en esa época, uniendo dos masas conductoras, una cargada y una descargada, mediante un alambre conductor, al fluir la carga del conductor cargado hacia el descargado, se establecía una corriente eléctrica de muy corta duración⁶⁰. Con posterioridad se establecieron "corrientes abiertas" mediante el uso de capacitores.

Como se mencionó antes, Faraday fue quien formuló las bases para un nuevo desarrollo filosófico y físico. Resulta conveniente entonces, hacer una semblanza breve, que nos permita entender el por qué de las concepciones y el programa de investigaciones de Faraday.

Michael Faraday nació en Newington Butts, muy cerca de Londres, el 22 de septiembre de 1791, su padre era un herrero. Recibió educación formal sólo entre los cinco y los trece años, edad a la que empezó a trabajar como aprendiz de encuadernador y se mostró interesado en la lectura de todos los libros, particularmente, los que se referían a ciencias.

Guiado por su interés en las ciencias, asistió a varias conferencias impartidas por Sir Humphry Davy, quien era presidente de la Real Sociedad Científica. Faraday solicitó empleo a Davy, quien tras revisar las notas que, relacionadas con sus conferencias había escrito Faraday, le ofreció empleo como su asistente, por un sueldo de 25 chelines a la semana y alojamiento.

Como asistente de Davy, Faraday se involucró en estudios relacionados con la química, su primera publicación apareció en 1816 y a partir de esta fecha, mostró ser un investigador prolífico ya que en un periodo de cuatro años, publicó alrededor de 40 artículos. A partir del año 1827, se inició como conferencista de la Real Sociedad, estableciendo un ciclo de conferencias populares, cuya duración se extendió por más de 30 años⁶¹.

Si bien Faraday era un gran experimentador, también tenía inclinaciones muy fuertes hacia la especulación metafísica. Era un hombre con creencias religiosas muy profundas y deseaba formular una teoría que conjuntara su visión de la naturaleza y sus creencias religiosas. Como es lógico, también estaba influenciado por las concepciones de Davy, su maestro y benefactor, quien a su vez, seguidor de Boscovich, concebía a la materia constituida por puntos rodeados por fuerzas atractivas y repulsivas⁶². Para Faraday, la concepción de acción a distancia, defendida por los seguidores de Newton, "*sólo era una especulación que muy probablemente era incorrecta*", de igual manera, no aceptaba que la electricidad fuera una sustancia fluida, él concebía a la electricidad como una manifestación de un estado especial de las fuerzas que constituían un cuerpo cargado. Su resistencia a aceptar los resultados (y sobre todo, la interpretación) de los experimentos de Ampère, se referían fundamentalmente a que Ampère:

⁶⁰ Berkson, W. (1985). Obra Citada

⁶¹ Shamos, M. (1959). Obra Citada

⁶² Nersessian, N. *Faraday to Einstein: Constructing Meaning in Scientific Theories*. Martinus Nijhof Publishers. Boston USA. 1984

- a) No proporcionaba una teoría unificada que permitiera explicar la electricidad estática y la electricidad dinámica.
- b) Usaba el concepto, “fuerzas instantáneas que actúan a distancia” (Faraday no aceptaba que no interviniera el medio).
- c) La relación encontrada, entre corrientes eléctricas, no era consistente con la conocida relación entre las cargas estáticas.
- d) Consideraba a la electricidad como un fluido.

Con respecto a la acción instantánea, Faraday⁶³ argumenta en sus artículos, que la acción magnética es progresiva, (es decir, que se propaga con velocidad finita y no instantáneamente), dice que el fenómeno de “difusión” de las fuerzas magnéticas ha de ser análogo a como se desplaza una perturbación en el agua, sin embargo, cuando hace estas declaraciones, no cuenta con evidencia experimental que respalde sus asertos.

Al reproducir algunos experimentos, Faraday encontró que, la aguja imantada a la que Oersted afirmaba que se le ejercían fuerzas de atracción y repulsión, no estaba sujeta a tales fuerzas, en realidad, dice Faraday, que encontró una fuerza “*simple y bella*”, que no era otra que, la fuerza circular que rodeaba al cable que portaba la corriente, la que causaba que la aguja magnética girara en torno al cable (o que el cable girara en torno a la aguja), en lugar de las complejas fuerzas de atracción y repulsión que actúan a distancia, postuladas por Newton y utilizadas por Ampère. De su ejecución experimental, obtuvo como un resultado importante “las rotaciones electromagnéticas” y además intuyó que si una corriente eléctrica producía un campo magnético, por simetría, debería ocurrir que un campo magnético produjera una corriente eléctrica. Como muestra de su gran capacidad como experimentador, Faraday encontró que no era una fuerza magnética, la que producía una corriente eléctrica, sino una fuerza magnética que estuviera cambiando (fuerza variable).

El camino seguido por Faraday para concluir que sólo “los campos magnéticos variables podían producir corrientes” es una muestra del gran ingenio experimental que poseía y su enorme percepción para poder valorar los trabajos de otros.

Francois Arago descubrió que cuando guardaba una brújula en su caja, la aguja imantada en movimiento, alcanzaba el reposo más rápidamente que si no la metía en la caja. Para tratar de explicar este fenómeno, experimentó poniendo la brújula sobre placas de diferentes materiales y encontró que, para algunos materiales, llegaba al reposo con mayor rapidez. A continuación, mantuvo en reposo a la brújula e hizo girar un disco de cobre bajo la brújula, encontró que la aguja tendía a girar con el disco. La conclusión de Arago fue que su disco en movimiento, se comportaba como un imán, pero al cesar el movimiento, el disco dejaba de ser magnético. Recordemos que, además, Arago había inventado el electroimán.

Un amigo de Faraday (G. Moll), le hizo notar la propiedad que tienen los electroimanes (aún los muy intensos), de invertir “casi instantáneamente” su polaridad.

Faraday concebía a la corriente eléctrica en un cable conductor como una manifestación de la vibración de las fuerzas, y las fuerzas obedecen una ley de conservación. Reuniendo los resultados obtenidos por Arago, la observación hecha por Moll y su concepción del campo de fuerzas, publicó en sus *Experimental Researches*, la siguiente hipótesis: “una variación repentina en las fuerzas que rodean

⁶³ Faraday, M. *Experimental Researches in Electricity*. Dover. New York. 1965

al conductor (las provocadas por un electroimán), deberán modificar el estado de tensión de las fuerzas en el conductor”⁶⁴ y explica que:

“EN UN ANILLO DE HIERRO ARROLLÓ UN CABLE EN LA MITAD DE DICHO ANILLO Y LO CONECTÓ A UNA BATERÍA (CIRCUITO PRIMARIO), EN LA OTRA MITAD DEL ANILLO ARROLLÓ OTRO CABLE, QUE CONECTÓ A UN GALVANÓMETRO (CIRCUITO SECUNDARIO)”.

Al abrir o cerrar el circuito primario, obtenía una corriente eléctrica en el circuito secundario. Dijo Faraday que el circuito secundario al encontrarse en el campo magnético del circuito primario, se encontraba en un estado especial de tensión al que denominó *estado electrotónico* y postuló: *la creación o variación del estado electrotónico produce siempre una corriente eléctrica*

Repitió el experimento arrollando helicoidalmente los cables a un núcleo de papel, cuando circulaba una corriente por el primario, aparecía una corriente en el secundario, al interrumpir la corriente en el primario, aparecía en el secundario una corriente de sentido contrario a la obtenida en el caso anterior.

A continuación, en un arrollamiento helicoidal de un cable conectado a un galvanómetro, introdujo un imán y observó el paso de una corriente; si sacaba el imán del arrollamiento, observaba una corriente de sentido contrario a la anterior.

Faraday concluyó: *Siempre que haya una disminución o un incremento de fuerza magnética, el resultado será una corriente eléctrica.*

En otro experimento, Faraday hizo girar un disco de cobre entre los polos de un imán con forma de herradura, mediante dos contactos, uno en el borde del disco y el segundo en el centro, observó el establecimiento de una corriente eléctrica. Este experimento explicaba la observación de Arago. *la imanación del disco se debía a las corrientes inducidas.* Este experimento es la base del desarrollo posterior del generador eléctrico.

Faraday hizo una importante variación del experimento del disco de cobre girando entre los polos de un imán, motivado por la duda que le representaba el que sólo parte del disco girara en regiones donde cambiara la fuerza magnética. Su dispositivo experimental fue el siguiente: fijó a un polo de un imán en forma de barra cilíndrica, el disco de cobre con los contactos en el centro y en el borde, como en el caso anterior, con lo que lograba que la fuerza magnética fuera simétrica con respecto al eje común del imán y del disco, de esta manera, el imán y el disco giraban “de manera solidaria”, de esta forma, ningún punto del disco podría experimentar cambio alguno en la intensidad de la fuerza magnética. El resultado obtenido fue sorprendente. ¡Obtenía una corriente eléctrica continua! era el mismo resultado que obtenía cuando sólo giraba el disco y el imán permanecía en reposo. Faraday escribió “*parece evidente la existencia de una peculiar independencia del magnetismo con respecto a la barra en que reside*”. Este experimento modificó sustancialmente su teoría de la inducción electromagnética. Antes de estos resultados, él consideraba que la inducción ocurría únicamente por el aumento o disminución de la intensidad de la fuerza magnética en un conductor (es decir, por la variación del estado electrotónico). Ahora la inducción ocurría porque el conductor simplemente se movía en una región de campo magnético constante. Es decir, bastaba con que el cable *cortara* a las líneas de fuerza para que se indujera una corriente eléctrica.

⁶⁴ Faraday, M. (1965). Obra Citada-

Al efecto que logró, de inducir una corriente en una espira de alambre que colocaba cercana a otra espira, lo denominó inducción “volta-eléctrica” y al efecto que lograba en una espira cuando acercaba (o alejaba) un imán, lo llamó inducción “magneto-eléctrica”. En sus escritos, Faraday⁶⁵ identificó que los dos efectos eran, en realidad, el mismo y postuló, como ya se mencionó, una nueva condición de la materia a la que denominó estado electrotónico. La importancia que reviste esta interpretación de Faraday radica en que, además de proveer una solución teórica de cómo una fuerza magnética cambiante puede producir una corriente eléctrica, establece que la presencia de una fuerza magnética crea un estado de tensión en un conductor, que más tarde consideraría como una tensión lateral, en su modelo de *líneas de fuerza*. La interpretación del fenómeno de inducción magneto-eléctrica, en la cual sólo había que identificar las causas por las que el simple movimiento del imán podía producir corriente, lo llevó al desarrollo teórico de su modelo de líneas de fuerza para la descripción de las interacciones electromagnéticas.

El modelo de líneas de fuerza, es guía fundamental del programa de investigación seguido por Faraday, a lo largo de gran parte de su vida como investigador, sin embargo, el modelo mismo va sufriendo una serie de modificaciones, fundamentalmente interpretativas, por parte del propio Faraday y, con mayor razón por parte de sus seguidores.

Originalmente, Faraday interpretó el hecho de que limaduras de hierro, en las cercanías de un imán, adoptaran el conocido patrón de curvas cerradas que se originaban y terminaban en los polos del imán extendiéndose en el espacio, era una manifestación clara de la forma “real” en que se transmitían las acciones eléctricas y magnéticas, postulando la existencia de las líneas de fuerza.

Mediante experimentos, encontró que la corriente inducida en un conductor es directamente proporcional al número de líneas de fuerza que corta dicho conductor. (en este caso, las líneas de fuerza son estáticas).

Cuando experimentó con dos espiras conductoras fijas, dispositivo en el que hacía pasar una corriente por una de las espiras y detectaba una corriente inducida en la segunda espira, consideraba a las líneas de fuerza como móviles ya que inicialmente se expandían (y así eran cortadas por la segunda espira) o bien, al desconectar la corriente, las líneas de fuerza se contraían (nuevamente eran cortadas por la segunda espira) y se generaba una corriente inducida en la segunda espira, con dirección contraria a la obtenida en el primer caso.

Realizó un experimento en el cual unió firmemente un imán en forma de barra por uno de sus extremos, con un disco, de manera que el eje de simetría circular de ambos coincidían y encontró que al hacerlos girar, se inducía una corriente en el disco; este resultado le permitió afirmar que: *lo que identificamos como materia no es otra cosa que una configuración particular de fuerzas y que las líneas de fuerza magnéticas residen en el espacio.*

Entonces, las concepciones de Faraday de las líneas de fuerza variaban: En ocasiones consideraba que se comportaban como entidades físicas, y cuando esto ocurría, las llamaba “*líneas físicas de fuerza*”, en otras ocasiones eran una mera manifestación de la configuración de las fuerzas, en cuyo caso las denominaba “*representativas*”, en otras ocasiones consideraba a las líneas de fuerza

⁶⁵ Faraday, M. (1965) Obra Citada

como “*trayectorias de transmisión de fuerza*” y en otras, las líneas eran consideradas como el vehículo que transmitía a las fuerzas⁶⁶.

Esta ambigüedad no demerita absolutamente en nada, los trabajos de Faraday. Sus concepciones sobre los fenómenos electromagnéticos, quedaron asentadas y sirvieron de base para posteriores desarrollos, que fueron más satisfactorios.

El mismo Faraday trató de aclarar su concepción sobre las líneas de fuerza, en su vigésimo octava investigación de sus “*Researches on Electricity and Magnetism*”, textualmente mencionó:

“...HE USADO EL TÉRMINO LÍNEAS DE FUERZA, DE MANERA TAN VAGA QUE HE DEJADO AL LECTOR DUBITATIVO, HE INTENTADO PLASMARLO COMO UNA IDEA REPRESENTATIVA DE LAS FUERZAS, HE INTENTADO HACER UNA DESCRIPCIÓN DE LA TRAYECTORIA A LO LARGO DE LA CUAL LA POTENCIA FUE CONTINUAMENTE EJERCIDA.

LO QUE HE DICHO AL PRINCIPIO DE ESTE ESCRITO (3075) DEBERÁ DEJAR EL ASUNTO CLARO. NO HE ENCONTRADO AUN UNA RAZÓN PARA MODIFICAR ALGUNA PARTE DE MIS ESCRITOS, EXCEPTO POR ESAS EXPRESIONES DUDOSAS, PERO ESO SERÁ RECTIFICADO SI SE ENTIENDE QUE DONDE QUIERA QUE APAREZCA LA EXPRESIÓN LÍNEA DE FUERZA, Y ESTA ES CONSIDERADA COMO REPRESENTATIVA DE LA DISPOSICIÓN DE LAS FUERZAS, ESTE SERÁ SU SIGNIFICADO PLENO; PERO AQUELLOS LUGARES DONDE PARECE QUE REPRESENTO LA IDEA DE UN MODO FÍSICO DE TRANSMISIÓN DE LA FUERZA, AHÍ SE ESTARÁ EXPRESANDO LA OPINIÓN POR LA QUE ME INCLINO EN ESE MOMENTO. LA OPINIÓN PUEDE SER ERRÓNEA Y AUN ASÍ, LO RELACIONADO CON LA DISPOSICIÓN DE LAS FUERZAS PERMANECERÁ INALTERADO⁶⁷.”

Como puede verse, Faraday en realidad no aclaró mucho sobre las líneas de fuerza en el párrafo anterior, sin embargo, en la próxima sección, quedará claro que los trabajos de Maxwell se fundamentan en las concepciones de Faraday y llegan, desde luego, a establecer una teoría de aceptación general.

Si algo hubiera de puntualizarse, para efectos de claridad en esta tesis, es que con respecto a las líneas de fuerza, Faraday establece:

- Las acciones eléctricas y magnéticas se transmiten continuamente en el espacio, mediante las líneas de fuerza.
- Las líneas de fuerza magnética son siempre curvas cerradas.
- Las líneas de fuerza magnética son una condición del espacio independiente de la presencia de partículas.
- Las líneas de fuerza eléctrica, existen por una sucesión de partículas (es decir, unen a las partículas)
- Existe una tensión a lo largo de las líneas de fuerza.
- Existe una tensión lateral que mantiene separadas a las líneas de fuerza.

⁶⁶ Nersessian, N. (1984). Obra Citada.

⁶⁷ Tomado de Nersessian, N.(1994). Obra Citada.

Capítulo 3

Las ideas de Maxwell

Introducción.- En este capítulo se hace una descripción detallada del proceso seguido por Maxwell para el establecimiento de su teoría; en el apartado que se ha titulado “La deducción de las leyes de campo electromagnético”, se mencionan las principales influencias tanto científicas como filosóficas que lo llevaron a la formulación de su teoría. En aras de la claridad, se optó hacer una descripción que, sin perder el rigor científico, hiciera énfasis en los aspectos intuitivos y explicativos, evitando hasta donde fuera posible, el desarrollo matemático riguroso, que en la mayoría de los casos hubiera resultado tedioso para quien está informado al respecto y, simultáneamente hubiera resultado oscuro a quien sólo está interesado en los aspectos educativos de este trabajo.

La formulación de Maxwell es una teoría “viva”, ya que en la actualidad, las explicaciones contextualmente aceptadas de los fenómenos electromagnéticos en el ámbito macroscópico, se hacen con base en ella y podríamos afirmar que la mayoría de los programas de investigación en esa rama de la física la toman como punto de partida o convergencia. Como toda teoría científica, al tratar de darle coherencia interna y externa, aparecieron algunos problemas cuya búsqueda de solución ha dado origen al desarrollo de otras formulaciones y estos aspectos se revisan, con brevedad, en el apartado que he denominado “Consecuencias de la teoría de Maxwell”.

Dado que ha cambiado la estructura de las matemáticas desde la época de la aparición de la teoría de Maxwell, hasta nuestros días, se hace en el apartado que se denomina “Las ecuaciones de Maxwell en la actualidad”, una deducción que usa las herramientas matemáticas modernas y simultáneamente se van identificando con las propuestas originales, evidenciando su identidad. En los aspectos que se consideró que lo ameritaba, se remite al lector a las referencias bibliográficas que pueden ampliar las explicaciones a partir de las matemáticas rigurosas.

a).- La deducción de las leyes del campo electromagnético.

A la mitad del siglo XIX, el panorama científico relacionado con la electricidad y el magnetismo era, *grosso modo*, el siguiente:

Las investigaciones de Faraday habían evidenciado a la electricidad y al magnetismo como problemas centrales de la física puesto que, como eran propiedades generales de la materia, se relacionaban con el comportamiento físico y químico de todas las sustancias. La teoría física que explicara los fenómenos eléctricos, magnéticos y ópticos, conocidos en esos momentos, estaba aun por construirse.

Era necesario, en primera instancia, encontrar y explicitar las relaciones entre la electrostática, la electrodinámica y el magnetismo. Por otro lado, permanecían aun inexplicados muchos fenómenos referentes a la interacción entre la electricidad y la materia, entre otras, permanecían poco claras las explicaciones referentes al comportamiento de los materiales dieléctricos, las sustancias diamagnéticas y las paramagnéticas. Existían controversias con respecto a la interpretación de cómo se relacionaban entre sí, los fenómenos eléctricos y magnéticos (inducción electromagnética). Asimismo permanecía como un problema importante la interpretación de las rotaciones magnéticas del plano de polarización de la luz.

Desde la perspectiva de Khun⁶⁸, a la teoría electromagnética, aun le faltaba tanto coherencia interna como coherencia con otras matrices disciplinares.

Por lo que a esta tesis se refiere, nuestro estudio se centrará en la búsqueda de cómo se dieron las soluciones a los problemas de establecer las relaciones entre:

1. Electricidad estática y corrientes eléctricas.
2. Electricidad y magnetismo (inducción electromagnética)
3. Radiación electromagnética y luz.
4. Radiación electromagnética y materia.

El personaje central de nuestro estudio es, desde luego, James Clerk Maxwell, quien con base en la perspectiva de Faraday, de la teoría de campos, fue el primero en intentar resolver la problemática que se menciona.

Incidieron de manera directa en los trabajos de Maxwell, los desarrollos llevados a cabo por André Marie Ampère, F. E. Neumann (1798-1895) y Wilhelm Eduard Weber (1804-1891) quienes, entre otros, pretendieron resolver los problemas relacionados con la electricidad, el magnetismo y la luz, desde el esquema físico-filosófico de Newton.

Por otro lado, influyeron en Maxwell, las ideas y los trabajos de Michael Faraday, los escritos de Helmholtz (1821-1894) y el método de trabajo establecido y empleado por William Thomson (1824-1907).

Los resultados obtenidos por André Marie Ampère, referentes a las interacciones entre corrientes, que ya se han mencionado en la sección anterior, fueron ampliados por F. E. Neumann en 1845⁶⁹, en su trabajo se incluyen las corrientes inducidas. Neumann argumentó que las corrientes inducidas podían obtenerse como una función matemática de las fuerzas "amperianas" entre corrientes, encontrando que dicha relación no era otra cosa que la rapidez de cambio del "potencial" de la fuerza "amperiana" que una corriente hace sobre otra. El concepto de potencial era conocido desde los trabajos de Poisson⁷⁰. Neumann construyó una nueva función matemática a la que denominó "vector potencial" debido a que dicha función tenía asociada una magnitud (módulo) y dirección. La función potencial vectorial de Neumann puede calcularse para cualquier elemento de corriente de un circuito que se encuentre inmerso en el campo que produce otro y matemáticamente puede representarse como la integral de circulación alrededor de cada elemento de corriente, considerado como vector, dividido entre la distancia que separa al elemento de corriente y el punto donde se calcula el potencial. La teoría de Neumann no abordó la relación entre electricidad estática y electricidad dinámica⁷¹.

Weber en 1848 publicó un documento⁷² en el que hizo un tratamiento matemático que unificaba la electricidad estática, la electricidad dinámica, la interacción entre corrientes y la inducción electromagnética. La teoría de Weber consideraba la existencia de partículas cargadas que interactuaban a distancia en forma instantánea, a través del espacio vacío. Su concepción de la

⁶⁸ Khun, T. (1971). *Obra Citada*.

⁶⁹ Neumann, F. E. *Berlin Adhandlungen*. Citado en Berkson, W. (1985). *Obra citada*

⁷⁰ Jeans, J. (1966) *Obra Citada*.

⁷¹ Berkson, W. (1985.) *Obra Citada*

⁷² Weber, W. *Annalen der Physik*, 73 (1848).

corriente eléctrica era que las partículas cargadas positivamente se movían en una dirección en tanto que las partículas cargadas negativamente, se movían en la dirección contraria, pero, al considerar estas corrientes en presencia de otra corriente (por otro cable conductor), las velocidades relativas de la corriente positiva y la negativa con respecto a la corriente en el otro cable, eran diferentes.

Weber explicó los efectos de la electricidad estática, la electricidad dinámica y la corriente inducida, mediante una ley matemática que consideraba que los efectos estáticos estaban dados por la conocida ley del inverso cuadrado (expresión de Coulomb), la interacción entre corrientes (expresión de Ampère) estaba explicada por un término que dependiera de las velocidades relativas de las partículas cargadas y los fenómenos inductivos estaban explicados por un término que incluía las aceleraciones de las partículas cargadas⁷³.

La teoría electromagnética de Weber marcó un hito en el desarrollo del electromagnetismo. Matemáticamente era consistente y “elegante”, además, partiendo de las ideas filosóficas de Newton, las modificaba sustancialmente al postular que las fuerzas electromagnéticas eran dependientes no sólo de la posición sino de la velocidad y la aceleración de las partículas.

La aceptación de las ideas de Weber, por parte importante de la comunidad científica, llevó a sus seguidores a tratar de sustituir la teoría gravitacional de Newton por una teoría “weberiana” de la gravitación, generando una controversia científica que no fue zanjada definitivamente sino hasta el año de 1853 en que Herman Von Helmholtz publica su artículo “On the conservation of force”⁷⁴. En este artículo estableció que cualquier variación al modelo de Newton (fuerzas centrales que sólo dependen de la posición) violaría el principio de conservación de la energía. Helmholtz identificó como una dificultad clara de las teorías que incluían el concepto de acción a distancia, el demostrar que dichas teorías cumplieran con el principio de conservación de la energía.

Es pertinente aclarar que originalmente se pensó en el “principio de conservación de la fuerza” y no en el principio de conservación de la energía. De diversas formas, algunos científicos, entre los que podemos mencionar a Leibniz, Boscovich, Davy y Faraday, habían postulado que las fuerzas presentaban una unidad, es decir, que podían transformarse unas en otras y desde mucho antes, se había demostrado que no podía crearse una cantidad ilimitada de fuerza (la búsqueda del *perpetua móvile*). Precisamente esta concepción fue la que impulsó a Faraday a hacer explícito el fenómeno de inducción electromagnética e hizo importante en grado superlativo, el trabajo correspondiente de Hans Christian Oersted. El que las fuerzas se conservaran o no, era irrelevante para la teoría mecánica de Newton ya que esta era una teoría consistente y “cerrada”; en el siguiente sentido: Dados, por ejemplo, la posición y velocidad de las masas en un instante cualquiera, para un sistema gravitacional, el comportamiento queda físicamente determinado, (esto es, no necesitamos postular que se conserve la fuerza). El principio de conservación de la fuerza se hizo importante cuando se pensó en aplicar las ideas de Newton a la electricidad, el magnetismo, la termodinámica, la química, etcétera. Cuando Helmholtz inició el análisis del problema (1847), ya se había demostrado que la electricidad podía transformarse en calor, luz, magnetismo y energía química. Particularmente, Faraday había demostrado en 1845 que los rayos de luz giraban al aplicárseles una fuerza magnética. La búsqueda del principio de conservación de energía se da simultáneamente en varios investigadores, los más conspicuos son Julius

⁷³ Harman, P. *Energy, Force & Matter: The Conceptual Development of Nineteen Century Physics*. Cambridge University Press, 1996

⁷⁴ Helmholtz, H. *On the conservation of force*. Scientific Memoirs. Ed. J. Tyndall & W. Francis. London 1853.

Robert Mayer (1814-1889), James Prescott Joule (1818-1889), William Thomson y Herman Von Helmholtz.

Maxwell desarrolló un programa de investigación, con base en las ideas de Faraday, con la concepción de que las acciones eléctricas y magnéticas se realizaban mediante un mecanismo distinto a la "acción a distancia" postulada por Newton.

Tomó como punto de partida el modelo teórico de Faraday de las líneas de fuerza, pero es importante resaltar que, a diferencia de Faraday, Maxwell era un investigador⁷⁵ con profundos conocimientos matemáticos, con una formación muy sólida en el campo de la física (termodinámica, elasticidad y desde luego, electricidad y magnetismo). Influenciado por las ideas de Faraday, estaba convencido de que no existía el vacío postulado por Newton, aceptaba que el espacio estaba "lleno" por un fluido imponderable "el éter", pero que, sin embargo, ese fluido poseía propiedades de inercia y elasticidad y por tanto, obedecía las leyes de la mecánica de Newton.

Se propuso en principio, fundamentar matemáticamente el concepto de Faraday sobre las líneas representativas de fuerza y a continuación, el concepto de líneas físicas de fuerza, pero con el objetivo final de incorporar a la electrodinámica en el marco de la teoría mecánica de Newton, lo que lograría si pudiera fundamentar que las líneas de fuerza eran la manifestación de un estado mecánico del éter.

Sus procedimientos tanto teóricos como experimentales, como ya se mencionó, estuvieron inspirados en el método de la analogía física, desarrollado por William Thomson, que consistía en transferir la solución matemática de un problema en una rama de la física, a otra nueva. El método involucraba el uso de similitud de formas, es decir, de un isomorfismo entre las leyes de diferentes fenómenos, como medio de obtener "ideas físicas, sin adoptar una teoría física"⁷⁶ y teniendo presente siempre que el carácter de las analogías físicas debería considerarse temporal y provisional, hasta en tanto se formulara la nueva teoría.

Maxwell utilizó el método de la analogía, en su escrito "On Faraday's lines of force", estableciendo un isomorfismo entre la intensidad y dirección de las líneas de fuerza en un punto y el flujo de un fluido incompresible a través de un tubo delgado de sección transversal variable, obteniendo una representación vectorial de las líneas de fuerza en términos del vector de un campo de velocidades de un flujo de fluidos⁷⁷. Uno de los aspectos que deben resaltarse en el establecimiento de esta analogía, es que Maxwell reemplazó un fenómeno discreto (la relación establecida por Faraday de que la intensidad de la fuerza es directamente proporcional al número de líneas de fuerza que son cortadas), por una medida continua, otro aspecto es que Maxwell elaboró un modelo geométrico del campo, la dirección de las fuerzas actuando en el campo podían ser representadas por líneas de fuerza que "llenaban" el espacio. Para explicar la intensidad de la fuerza, supuso un fluido incompresible moviéndose en tubos formados por líneas de fuerza. Puso, en su escrito, cuidado especial en mencionar que: *"el fluido no es ni siquiera un fluido hipotético, no es una representación física del campo, es exclusivamente una colección de propiedades imaginarias"*. La representación matemática que logró, tenía la ventaja de proveer una representación visual de las líneas de fuerza, que permitía analizar el

⁷⁵ Véase el apéndice A. "Rasgos Biográficos de Maxwell"

⁷⁶ Nersessian, N. (1984). *Obra Citada*

⁷⁷ La notación vectorial que actualmente se usa, fue diseñada con posterioridad por Gibbs, en los Estados Unidos de América y Heaviside en Inglaterra.

fenómeno con mayor facilidad. Sin embargo, debe quedar claro que el modelo geométrico establecido por Maxwell, en el que representaba al campo mediante líneas de fuerza, suponía la asunción de un espacio absoluto, que constituía la base primordial para establecer las relaciones entre las entidades materiales, esta hipótesis asumía que la estructura del espacio no estaba determinada por la disposición del campo; el campo, representado mediante líneas de fuerza, estaba en el espacio.

Para Maxwell, el espacio es una categoría ontológica y por tanto, es una condición para la existencia del campo⁷⁸.

En su siguiente escrito "On Physical lines of force", que se divide en tres partes:

- I. Fenómenos magnéticos
- II. Corrientes eléctricas e inducción electromagnética y
- III. Electricidad estática.

Maxwell tomó la otra concepción de Faraday de que las líneas de fuerza tenían una realidad física, que eran esenciales para la descripción de las acciones eléctricas y magnéticas, pero, agregó la hipótesis física de que "las líneas de fuerza son estados de un medio mecánico", de esta manera, pasó de la construcción geométrica de las líneas de fuerza a un tratamiento del campo electromagnético "desde el punto de vista de la mecánica de Newton".

Con respecto al magnetismo, las cuestiones que pretendía responder eran:

1. La tensión a lo largo de las líneas de fuerza
2. La repulsión lateral entre las líneas de fuerza
3. La ocurrencia de la interacción entre magnetismo y electricidad, en ángulos rectos.
4. La rotación del plano de luz polarizada, a través de un medio diamagnético; por acción magnética.

Los puntos 3) y 4), contaban ya con evidencia experimental, no así los dos primeros, que sólo eran concepciones de Faraday.

Siendo Maxwell un experto en el comportamiento de sólidos elásticos y, convencido de las bondades del método de las analogías físicas establecido por W. Thomson, desarrolló una analogía entre las fuerzas eléctricas y magnéticas con los desplazamientos de las partículas en un sólido elástico sujeto a esfuerzos mecánicos, pero teniendo muy claro que no estaba afirmando que existiera alguna conexión de este tipo en la naturaleza, la analogía serviría únicamente para entender de manera provisional los fenómenos eléctricos y magnéticos⁷⁹.

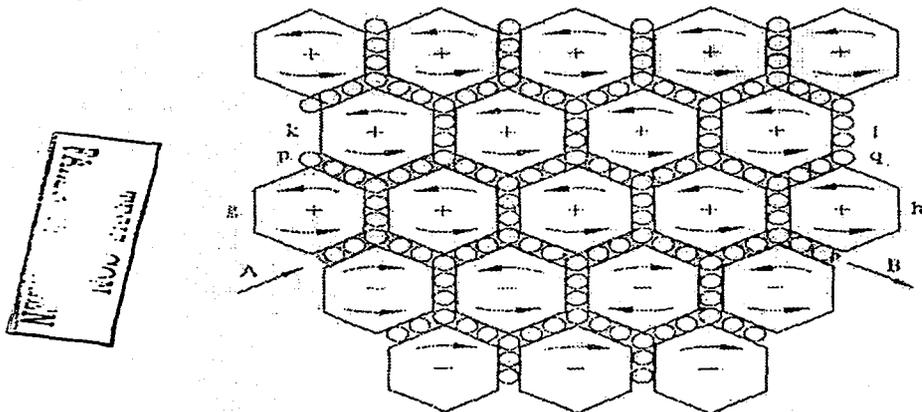
Para el desarrollo de su analogía mecánica con los efectos eléctricos y magnéticos, Maxwell construyó (mentalmente) un modelo mecánico que debería ser consistente tanto con las constricciones planteadas por las especulaciones de Faraday como con los resultados experimentales.

⁷⁸ Harman, P. (1966) Obra Citada.

⁷⁹ Nersessian, N. *How Do Scientists Think?: Capturing the Dynamics of Conceptual Changes in Science*. En Giere R. (ed) *Cognitive Models of Science*. Minnesota Studies in the Philosophy of Science Vol XV. University of Minnesota Press. Cambridge. 93-131. USA. 1966

Impuso Maxwell a su modelo, la restricción de que se cumpliera la ley del inverso cuadrado ya establecido para las interacciones electrostáticas y las magnetostáticas y en general, el modelo habría de respetar las leyes de Newton de la mecánica. Sin embargo, no aceptaba la acción a distancia. Su modelo debería ser capaz de explicar los fenómenos, suponiendo una acción por contigüidad y necesariamente, las interacciones se realizarían en un tiempo finito.

El modelo mecánico en sí, consideraba que existían unos "remolinos en rotación", que asoció con el magnetismo. La corriente eléctrica estaba explicada por el movimiento de partículas eléctricas (bolitas), que al moverse, rozaban a los remolinos magnéticos, obligándolos a girar, el movimiento de giro de los remolinos arrastraba a las partículas eléctricas que los rodeaban y así, todo se ponía en movimiento, de esta manera concluyó que el movimiento de partículas eléctricas, producían un campo magnético, la figura que se muestra a continuación es una representación esquemática del modelo mecánico de Maxwell: (figura tomada de Berkson, W. 1985)



Esquema de la representación del modelo mecánico de Maxwell

Para explicar la inducción, el razonamiento fue que, en un cable por el que se movían partículas eléctricas, los remolinos colocados en lados opuestos, deberán girar con velocidades diferentes, el remolino que quedara en límite del conductor, estaría en contacto con remolinos pertenecientes a un dieléctrico (el medio que rodeaba al cable). En el dieléctrico los remolinos girarían con velocidades iguales y las "bolitas" del dieléctrico quedarían girando en su sitio, sin desplazarse.

La situación anteriormente descrita, permanecería en tanto la corriente se mantuviera estacionaria, pero si dicha corriente variaba significaría, por ejemplo, que la velocidad de las partículas eléctricas disminuiría ocasionando una pérdida de velocidad en los remolinos adyacentes y por tanto, una diferencia de velocidad entre estos remolinos y la capa siguiente, causando que las partículas eléctricas entre ambas capas, tendieran a ponerse en movimiento. La diferencia de velocidades de los remolinos sería absorbida inicialmente por una deformación elástica de los remolinos, generando fuerzas sobre las partículas eléctricas y por tanto reducirían su velocidad. De esta manera, pasaría por

todo el campo una onda de desplazamiento de las partículas eléctricas. Cuando esta onda llegaba a otro cable, las partículas eléctricas se pondrían en movimiento y se habría inducido una corriente eléctrica.

El modelo mecánico ideado por Maxwell, asociaba propiedades mecánicas con propiedades eléctricas y/o magnéticas, de la siguiente forma:

- a) La intensidad de corriente i está representada por el número de partículas eléctricas (bolitas) que pasan por un punto del conductor, en una unidad de tiempo.
- b) La intensidad de la fuerza magnética \vec{H} está asociada con la velocidad superficial del remolino y su dirección es la dirección del eje de giro del remolino (el norte es hacia donde miramos, si, por el eje observamos y el remolino tiene giro en sentido horario). En el lenguaje actual, la fuerza magnética está relacionada con el vector momento angular del remolino, las direcciones de los vectores son las que establece la "regla de la mano derecha" para sistemas dextrógiros.
- c) La densidad media (masa) de los remolinos se corresponde con la permeabilidad magnética μ del medio.
- d) La energía U_M del campo, está asociada con la energía cinética de los remolinos (proporcional a $\mu \vec{H}^2$)
- e) Las fuerzas tangenciales que sobre las partículas eléctricas, ejercen las capas adyacentes de remolinos, que giran con velocidades diferentes, están asociadas con parte de la fuerza electromotriz \vec{E} debida a la inducción, (la fuerza electromotriz está integrada por tres contribuciones fundamentales, como se establecerá más adelante).
- f) El potencial vectorial \vec{A} (estado electrotónico), está relacionado con el momento de los remolinos y por lo tanto, la fuerza electromotriz \vec{E} está relacionada con la variación del momento de los remolinos.
- g) En los dieléctricos, las partículas eléctricas no pueden desplazarse, cuando se les aplican fuerzas, las partículas se deforman elásticamente. El grado en que el material de estas bolas se desplaza, por efecto de las fuerzas aplicadas, depende de la constante de elasticidad de las bolas. El desplazamiento total \vec{D} es entonces, directamente proporcional a las fuerzas aplicadas, la constante de proporcionalidad es análoga a la constante dieléctrica del medio ($\vec{D} = \epsilon \vec{E}$)
- h) La energía del campo eléctrico U_E está asociada con las energía elástica de las partículas deformadas $U_E = \vec{D} \cdot \vec{E} = \epsilon \vec{E}^2$
- i) La carga eléctrica, es producida por una presión mutua que ejercen las partículas eléctricas (bolitas). Dicha presión es análoga al potencial eléctrico Ψ .

- j) Un cuerpo cargado, es entonces, aquel cuyas partículas eléctricas ejercen una presión sobre el medio (dieléctrico) circundante.

Las asociaciones que realizó Maxwell entre propiedades mecánicas y electromagnéticas, deben considerarse cuidadosamente. Recordemos que estaba utilizando el método de las analogías y que cuando se refiere, por ejemplo, a la identificación de la intensidad de las fuerzas, con el flujo de un fluido incompresible, indica de manera expresa que *"el fluido no es ni siquiera un fluido hipotético, no es una representación física del campo, es exclusivamente una colección de propiedades imaginarias"*.

Entonces, cuando identifica a la corriente eléctrica con el número de partículas eléctricas que pasan por un punto en un una unidad de tiempo, está asociando bolitas cargadas que se mueven ordenadamente. Cabe aclarar que en esta definición de corriente, no le fue necesario indicar las características de dichas bolitas, no se refiere a su forma, tamaño, masa u otras propiedades, sólo interesa que posean carga.

Desde luego, no debe haber duda de que Maxwell conocía las diferentes concepciones que sobre corriente eléctrica existían en esa época, por ejemplo: Oersted pensaba que el paso de la electricidad a través de un conductor era una serie de interrupciones y restablecimientos de equilibrio, de tal suerte que las fuerzas eléctricas en la corriente no estaban en equilibrio estable, sino en un estado de conflicto continuo⁸⁰, Weber concebía dos "fluidos" uno positivo y otro negativo, que se movían en sentidos contrarios en tanto que, Faraday al considerar que la carga eléctrica no es el resultado de dos clases especiales de materia, los fluidos eléctricos positivo y negativo, sino más bien, el resultado de una propiedad específica de la materia (o fuerza) que constituye el cuerpo cargado, identifica a la corriente como una onda de variación de esa propiedad, que se transmite por un conductor.

Resulta relevante indicar además que, a Maxwell le interesaba fundamentalmente, que las propiedades a las que se refería, pudieran ser consideradas en el "rango de las cantidades físicas", es decir, propiedades que pueden ser *medidas* y pueden ser *calificadas*. Para aclarar este párrafo, tomemos, por ejemplo, los argumentos empleados por Maxwell en su escrito "A treatise on electricity and magnetism", cuando se refiere al concepto de carga :

"III. CUANDO LA ELECTRIFICACIÓN ES PRODUCIDA POR FRICCIÓN O POR CUALQUIER OTRO MÉTODO CONOCIDO, SE PRODUCEN CANTIDADES IGUALES DE ELECTRIFICACIÓN POSITIVA Y NEGATIVA.

LA ELECTRIFICACIÓN PUEDE SER VERIFICADA PARA TODO EL SISTEMA, MEDIANTE EL USO DE UN ELECTROSCOPIO.

LA ELECTRIFICACIÓN DE UN CUERPO ES POR LO TANTO UNA CANTIDAD SUSCEPTIBLE DE SER MEDIDA Y DOS O MÁS ELECTRIFICACIONES PUEDEN SER COMBINADAS EXPERIMENTALMENTE CON UN RESULTADO DEL MISMO TIPO QUE CUANDO DOS CANTIDADES PUEDEN SER SUMADAS ALGEBRAICAMENTE. ESTAMOS ENTONCES AUTORIZADOS A USAR UN LENGUAJE CON EL QUE PODEMOS TANTO CUANTIFICAR COMO CUALIFICAR A LA ELECTRIFICACIÓN Y EN CONSECUENCIA, HABLAR DE UN CUERPO ELECTRIFICADO COMO UN CUERPO QUE SE ENCUENTRA "CARGADO CON UNA CIERTA CANTIDAD DE ELECTRICIDAD POSITIVA O NEGATIVA"

EN TANTO ADMITAMOS A LA ELECTRICIDAD COMO LO HEMOS HECHO, LLEVÁNDOLA AL RANGO DE UNA CANTIDAD FÍSICA, NO DEBEMOS APRESURARNOS A ASUMIR SI ESTA ES O NO UNA SUBSTANCIA, O SI ES O NO UNA FORMA DE ENERGÍA O SI PERTENECE O NO A UNA CATEGORÍA CONOCIDA DE ALGUNA CANTIDAD FÍSICA. TODO LO QUE HEMOS PROBADO, HASTA ESTE MOMENTO, ES QUE NO PUEDE SER CREADA NI ANIQUILADA, ASÍ QUE LA CANTIDAD TOTAL DE ELECTRICIDAD DENTRO DE UNA SUPERFICIE CERRADA QUE SEA INCREMENTADA O DISMINUIDA, SÓLO PODRÁ AUMENTAR O DISMINUIR, SI CRUZA HACIA ADENTRO O HACIA FUERA DE DICHA SUPERFICIE CERRADA. ESTO ES CIERTO PARA LA MATERIA Y ESTÁ EXPRESADO POR LA CONOCIDA ECUACIÓN DE CONTINUIDAD EN HIDRODINÁMICA."⁸¹

⁸⁰ H.C. Oersted. *Scientific Papers*. Copenhagen 1920.-Citado en Berkson, W (1985) Obra Citada.

⁸¹ Maxwell, J. *A Treatise on Electricity and Magnetism*. Vol. II. Dover. New York. 1954.

En el inciso b), se identifica a la intensidad de fuerza magnética con la velocidad superficial del remolino. Aclaremos lo siguiente:

La concepción de Faraday ya ha sido explicada en esta tesis, para él las fuerzas eran la sustancia única del universo y actuaban por contigüidad, es decir, cada punto de fuerza del campo actúa únicamente sobre puntos contiguos (no explica como). Esta concepción de fuerza era diferente desde luego a la concepción de Newton, quien consideraba, como también ha sido explicado, que cada partícula ejerce fuerzas a distancia sobre otras partículas, de forma instantánea. Maxwell al igual que Faraday, consideraba que un cuerpo no actúa directamente sobre otro, sino progresivamente a través del campo. Sin embargo, distinguía entre materia y fuerza. Basado en sus conocimientos de los sistemas mecánicos (hidrodinámica), estableció una relación entre la fuerza magnética y el vector momento angular de unos remolinos hipotéticos y como ya explicamos, no es necesario pensar que realmente existen dichos remolinos, ni que exista una relación de este tipo en la naturaleza, nótese además que Maxwell no definió (en ese momento) si sus remolinos eran rígidos o elásticos, cual era su tamaño, si poseían alguna composición, etcétera. Lo que pretendía era ajustar un modelo teórico conocido (mecánico), con un modelo teórico desconocido (electromagnético), para trasladar las soluciones matemáticas del problema en un campo de la física, a otro campo.

Para establecer esta analogía, Maxwell partió de las concepciones de Faraday referidas a que:

- ❖ Existe una tensión a lo largo de las líneas de fuerza.
- ❖ Existe una presión lateral que mantiene separadas a las líneas de fuerza.
- ❖ La forma que toman las líneas de fuerza en cada situación, depende de la permeabilidad magnética del medio.
- ❖ El movimiento de un cuerpo, magnético o diamagnético, queda determinado por la presión a lo largo y entre las líneas de fuerza.

Usando como base para su analogía a un sistema mecánico, Maxwell intentaba, entonces, encontrar causas que lograran los efectos de producir tensiones a lo largo de las líneas de fuerza y presión lateral entre ellas. Siendo un conocedor profundo del comportamiento del flujo de fluidos, propuso la existencia de remolinos centrados en las líneas de fuerza, de manera tal que al girar, las presiones fuera del eje fueran mayores que a lo largo de la línea. Encontrando una expresión matemática correcta que explicara esta diferencia de presiones, podría calcular las tensiones a lo largo de las líneas de fuerza. Conocidas las tensiones a lo largo de las líneas de fuerza, se podría conocer su distribución y por tanto, las presiones que las mantenían separadas.

El cálculo de la diferencia de presiones, derivada de su modelo mecánico dio como resultado:

$$P_1 - P_2 = \left(\frac{\mu}{4\pi} \right) \overline{H}^2$$

Siendo \overline{H} la velocidad angular del remolino y el término restante $\frac{\mu}{4\pi}$ una constante que depende de la densidad (masa) del remolino.

Desde luego, esta expresión se refiere a una diferencia de presiones en todas las direcciones, Maxwell separó dos términos, una diferencia de presión a lo largo de las líneas de fuerza y la restante en todas las demás direcciones.

A partir de sus cálculos^{*2} asoció con la tensión a lo largo de las líneas de fuerza, el término:

$$T = \left(\frac{\mu}{8\pi} \right) \overline{H}^2$$

Los cálculos que realizó Maxwell, resultarían complicados y tediosos si se detallaran en esta tesis, fueron hechos "componente a componente" y culminaron en el establecimiento de lo que hoy conocemos como un *tensor*, a partir del cual puede conocerse la fuerza resultante sobre cualquier punto del medio.

Al tensor encontrado, Maxwell lo utilizó en el caso particular de un medio con permeabilidad magnética uniforme y en ausencia de corrientes eléctricas, encontrando que las fuerzas cumplían con la ley de inverso cuadrado de Newton. Esto le permitió asumir la validez de su modelo y la identificación justificada del momento angular de los remolinos con la intensidad magnética \overline{H} .

La identificación que logró Maxwell, de la intensidad magnética \overline{H} con el momento angular de los remolinos, definía en gran parte las analogías restantes, mismas que habrían de ser consistentes con ésta.

El inciso c) que establece la relación entre la permeabilidad magnética del medio μ y la densidad (masa) de los remolinos, ya ha sido explicada.

El inciso d) que se refiere a la energía del campo magnético, relacionada con el término $\mu \overline{H}^2$, queda simplemente explicado y determinado por las dimensiones físicas de las magnitudes involucradas.

Uno de los problemas centrales que abordaba el trabajo de Maxwell era el explicar la relación entre las corrientes eléctricas y el campo magnético. En su modelo mecánico lo anterior se refería a encontrar la relación entre el movimiento de las bolitas eléctricas y las rotaciones de los remolinos, en síntesis, era necesario demostrar que:

- ❖ El movimiento de las bolitas, daba lugar a la distribución correcta de las velocidades de los remolinos.
- ❖ Las variaciones de las velocidades de los remolinos, daban lugar al movimiento correcto de las bolitas eléctricas.

Maxwell sabía que un "piñón loco" en un dispositivo mecánico, adquiere una velocidad de traslación que es directamente proporcional a la semidiferencia de las velocidades de los engranes

*2 Maxwell, J. (1954) Obra Citada.

adyacentes, por lo cual, consideró a las bolas eléctricas como rígidas, para que se comportaran similarmente a los “piñones locos”

La función matemática que encontró, para explicar la relación entre los movimientos de las bolas eléctricas y los remolinos, es el operador vectorial que actualmente conocemos como *rotacional*.

Una interpretación física actual, del rotacional de un campo de fuerzas, está dada por el par que se ejerce sobre una pequeña esfera situada en un punto del campo. Maxwell supone que existen $\left(\frac{1}{2\pi}\right)$ bolas eléctricas por cada unidad de superficie de remolino, obteniendo la ecuación:

$$\vec{i} = \left(\frac{1}{4\pi}\right) \nabla \times \vec{H}$$

Donde \vec{i} es la corriente eléctrica y \vec{H} es la intensidad de fuerza magnética⁸³.

Los incisos e) y f) se refieren a la inducción electromagnética. Recordemos que la evidencia experimental lograda por Faraday era:

- ❖ Un campo magnético variable induce una corriente eléctrica en un conductor (que se encuentre en reposo).
- ❖ Si un cable conductor se mueve en un campo magnético (aun en el caso de que el campo, sea uniforme), se induce en el conductor una corriente eléctrica.
- ❖ El movimiento relativo entre un imán y una espira conductora, induce una corriente eléctrica en la espira conductora.
- ❖ Dadas dos espiras conductoras cercanas, si por una de ellas circula una corriente eléctrica, cualquier variación en la corriente eléctrica, induce una corriente eléctrica en la otra espira.

Maxwell hizo un análisis del fenómeno de inducción electromagnética, basado en consideraciones energéticas. El principio de conservación de la energía le brindaba la posibilidad de adecuar su modelo mecánico a los resultados experimentales obtenidos para el electromagnetismo. Su proceder, hace pensar que estaba guiado por la regla de pertinencia puesto que si usaba el principio de conservación de la energía, podría evitar el hacer hipótesis sobre las características elásticas de las bolas eléctricas.

Realizó su análisis en dos etapas:

Primero calculó las variaciones de las fuerzas que intervienen cuando se cambia el campo magnético, en tanto que el cable conductor se encuentra en reposo. Sus argumentos fueron simples y directos:

Una variación en la fuerza magnética \vec{H} (producida por una corriente eléctrica que circula por un cable A), producirá una variación de fuerza electromotriz \vec{E} , (que originará una corriente

⁸³ Berkson, W. (1985) Obra citada.

eléctrica en un segundo cable B). Para calcular \vec{E} en el segundo cable, conocía la densidad de energía cinética de los remolinos $\left(\frac{\mu}{8\pi}\right)H^2$, y sabía que, cualquier variación de la energía en el segundo cable, estaría explicada por el movimiento de las bolas eléctricas, movimiento que, por tercera ley de Newton, estaría relacionado con el cambio en la velocidad de los remolinos. La función matemática que encontró, fue la siguiente:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = \mu \left(\frac{d\vec{H}}{dt} \right)$$

En la segunda etapa analizó las variaciones de las fuerzas que intervenían en el caso de que el campo magnético permaneciera constante y el cable conductor se moviera. Para este caso concreto, si hizo consideraciones sobre los remolinos, a los que consideró como cuerpos deformables. Argumentó que el movimiento de un cable conductor a través de un remolino, tendería a deformarlo. Si el remolino se estiraba, aumentaba su velocidad, si era comprimido, su velocidad disminuía.

El caso ideal que planteó Maxwell fue el siguiente: Considere un conjunto de remolinos todos con los ejes de giro paralelos y un cable conductor cuyo eje longitudinal es perpendicular a la dirección de los ejes de los remolinos. Cuando el cable se mueva en una dirección perpendicular tanto a los ejes de los remolinos como a su eje longitudinal, comprimirá a los remolinos delante de él, disminuyéndoles la velocidad, en tanto que los remolinos detrás de él, permanecerán inalterados. El diferencial de velocidad entre las capas adyacentes de remolinos, producirá que las bolas eléctricas entre ellos, se muevan.

La función matemáticas que Maxwell encontró, con estos argumentos fue:

$$\vec{E} = \vec{V} \times \mu \vec{H}$$

Donde \vec{E} es la fuerza electromotriz, \vec{V} la velocidad y \vec{H} la intensidad magnética.

Adicionalmente, encontró que el término $\mu \vec{H}$ puede ser obtenido mediante la expresión:

$$\vec{\nabla} \times \vec{A} = \mu \vec{H}$$

Donde el vector \vec{A} representa el *estado electroiónico* definido por Faraday.

Estos resultados obtenidos por Maxwell⁸⁴, son los que le permiten establecer la expresión:

$$\vec{E} = \vec{\nabla} \Psi + \frac{d\vec{A}}{dt} + \vec{V} \times \mu \vec{H}$$

Que establece que la fuerza electromotriz \vec{E} , está compuesta por tres términos que son:

⁸⁴ Harman, P. (1996) Obra Citada

1). La fuerza eléctrica originada por la carga estática y expresada por el gradiente del potencial Ψ

2). La fuerza de inducción electromagnética debida a la variación del estado electrostático, que Maxwell identificó como el efecto producido sobre los remolinos, cuando estos no cambian su posición, expresada como la derivada $\frac{d\vec{A}}{dt}$

Es conveniente aclarar que Faraday había afirmado que:

"TODO CUERPO SOBRE EL QUE ACTÚA UNA FUERZA DEBE SUFRIR UNA ALTERACIÓN EN SU ESTRUCTURA INTERNA, LO CUAL SE SIGUE DE LA UNIDAD ENTRE FUERZA Y MATERIA YA QUE UN CUERPO NO ES SINO UN COMPLEJO DE FUERZAS Y LAS FUERZAS EXTERIORES SON EN ESENCIA DE LA MISMA NATURALEZA QUE LAS DEL CUERPO Y DEBEN INTERACCIONAR CON LAS DEL CUERPO. POR LO TANTO EL CUERPO ESTARÁ EN UN ESTADO DE TENSIÓN O DE ALTERACIÓN DE SU ESTRUCTURA. POR EJEMPLO, CUANDO UN CAMPO MAGNÉTICO ACTÚA SOBRE UN CONDUCTOR, ESTE QUEDA EN UN ESTADO ESPECIAL DE TENSIÓN, EN UN "ESTADO ELECTROSTÁTICO"⁸⁵

3). La fuerza de inducción electromagnética originada por la deformación de los remolinos causada por el movimiento del conductor y expresada a través del producto vectorial $\vec{\nabla} \times \mu \vec{H}$

Para establecer el contenido del inciso g) con base en su modelo, Maxwell introdujo una hipótesis sobre la elasticidad de los remolinos: Postuló que la magnitud del desplazamiento de la materia de los remolinos era directamente proporcional a la fuerza electromotriz que actuaba sobre la pared de los remolinos, es decir:

$\vec{D} = \left(\frac{1}{4\pi c^2} \right) \vec{E}$, donde c es la constante de elasticidad de los remolinos y el término $\frac{1}{4\pi c^2}$ resulta ser la capacidad inductiva del medio ϵ .

La analogía mecánica que empleó Maxwell es la siguiente:

"SI SUPONEMOS DOS PARTÍCULAS ELÉCTRICAS EN UN DIELECTRICO Y ENTRE ELLAS SE ENCUENTRA UN REMOLINO, DEBIDO A LA FUERZA ELECTROMOTRIZ, ES POSIBLE QUE EL REMOLINO SE ENCUENTRE MUY ESTIRADO, PERPENDICULARMENTE A SU EJE. ESTE ESTIRAMIENTO ES ANÁLOGO A LA POLARIZACIÓN ELÉCTRICA. SI EL REMOLINO DEBIDO A SU ELASTICIDAD, SE RECUPERA, EL MATERIAL QUE LO CONSTITUYE RETORNA A SU POSICIÓN ORIGINAL. MIENTRAS TIENE LUGAR ESTA RECUPERACIÓN, EL MATERIAL DEL REMOLINO SE MOVERÁ EN DIRECCIONES CONTRARIAS, ASÍ PUES, LAS BOLAS ELÉCTRICAS SE PONDRÁN EN MOVIMIENTO EN DIRECCIONES CONTRARIAS IGUAL QUE SI HUBIESE CONDUCCIÓN. ES DECIR, UN CAMBIO DE DESPLAZAMIENTO PRODUCE, DE IGUAL MANERA QUE UNA CORRIENTE ELÉCTRICA, UN CAMPO MAGNÉTICO"⁸⁶.

Maxwell llegó a la importante conclusión de que a la corriente de conducción debíamos sumarle la corriente de desplazamiento para obtener la corriente total, que es la responsable del campo magnético. Matemáticamente lo expresó así:

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = 4\pi \vec{J} + \frac{d\vec{D}}{dt}$$

Finalmente, el inciso i) de las propiedades del modelo de Maxwell, tiene como origen, el texto insertado en la página 33. Es claro que Maxwell utilizó, para su análisis, el concepto de corriente

⁸⁵ Faraday, M. (1965) Obra Citada.

⁸⁶ Berkson, W. (1985.) Obra Citada.

eléctrica, considerando a la carga eléctrica como algo ajeno a su modelo (las bolas eléctricas ya tenían carga cuando las consideraba). Para deducir la relación entre la carga y la fuerza eléctrica, utilizó la ecuación de continuidad:

$$\nabla \cdot \vec{J} + \frac{dq}{dt} = 0$$

Donde \vec{J} es la densidad de corriente y q la carga eléctrica; significando esta expresión matemática que: La variación de la cantidad de carga en una región dada es igual a la diferencia entre la cantidad de corriente que sale de la región y la cantidad de corriente que entra en la región.

Combinando la ecuación de la corriente de conducción, con la ecuación de la corriente total, Maxwell dedujo la relación entre la carga eléctrica y el desplazamiento:

$$q = \nabla \cdot \vec{D}$$

Para establecer la interacción entre el campo eléctrico y las cargas, Maxwell se basó también, en consideraciones energéticas, argumentó que si dos cuerpos cargados se acercaban uno a otro muy lentamente, el campo magnético que se originaba era despreciablemente pequeño y la conservación de energía debería cumplirse, considerando exclusivamente al campo eléctrico.

Como la energía del campo eléctrico era equivalente al trabajo que realizaba la fuerza electromotriz sobre las partículas eléctricas, el trabajo era el producto de la fuerza electromotriz por el desplazamiento producido y, conociendo la distribución de desplazamiento en torno a una carga, se podía calcular el cambio de energía producido por el cambio de configuración de las cargas. Mediante este procedimiento, era posible determinar qué fuerza debía ejercer el campo sobre una carga, para que se cumpliera el principio de conservación de la energía. De esta manera, Maxwell encontró que dos cargas interactuaban de conformidad con la expresión:

$$\vec{F} = c^2 \left(\frac{q_1 q_2}{r^2} \right) \hat{r}$$

Donde la constante c estaba relacionada con la capacidad inductiva específica del medio, según la ecuación:

$$\epsilon = \frac{1}{4\pi c^2}$$

Es de destacarse, que Maxwell encontró que la interacción entre dos cargas eléctricas, obedecía la ley del inverso cuadrado, de conformidad con la ley de Coulomb y además, incluyó una corrección para los dieléctricos.

Como ya se indicó, Maxwell no era partidario de la acción instantánea a distancia. Una de sus preocupaciones fundamentales era demostrar que la inducción electromagnética tenía una velocidad finita.

De conformidad con la teoría de Newton, para que se propaguen ondas transversales en un medio mecánico, es condición necesaria que el medio posea inercia y elasticidad. En este esquema teórico, el cuadrado de la rapidez de propagación de las ondas transversales es igual al cociente entre la rigidez y la densidad de masa del medio:

$$\bar{V}^2 = \frac{r}{d}$$

El modelo mecánico de Maxwell poseía, tanto en las partículas eléctricas como en los remolinos, propiedades de masa y elasticidad. Para determinar la velocidad de propagación de las ondas en su modelo, hizo las siguientes hipótesis:

- a) La masa de las partículas eléctricas era despreciablemente pequeña.
- b) La elasticidad de las partículas eléctricas era, también despreciable.
- c) La densidad de masa de los remolinos, estaba relacionada con la permeabilidad magnética del medio, según la expresión: $d = \pi\mu$.
- d) El desplazamiento de la materia de los remolinos, era proporcional a la fuerza electromotriz que actuaba sobre ellos, con constante de proporcionalidad análoga a la capacidad inductiva específica del medio.
- e) La rigidez de los remolinos estaba relacionada solamente con el desplazamiento tangencial de la materia que los compone (no con la dilatación o compresión volumétrica).
- f) Las relaciones que encontrara, deberían cumplirse tanto para el caso dinámico (presencia de fuerza electromotriz), como en el caso estático.
- g) La fuerza electromotriz que actuaba sobre los remolinos, variaba con el seno del ángulo formado por las líneas tangentes tanto a la posible trayectoria de la partícula como al remolino, y cuyo origen era el punto de contacto entre la partícula eléctrica y el remolino.

Con estas hipótesis de trabajo, Maxwell encontró que la capacidad inductiva específica del medio estaba relacionada con la rigidez, según la expresión:

$$\varepsilon = \frac{1}{4\pi c^2}$$

Donde

$$r = \pi c^2$$

Entonces, como $V^2 = \frac{r}{d} = \frac{\pi c^2}{\pi\mu} = \frac{c^2}{\mu}$, Maxwell había encontrado uno de sus resultados más importantes de la teoría:

Midiendo la capacidad inductiva específica ϵ y la permeabilidad magnética del medio μ , podía predecirse la velocidad de las ondas de inducción.

Desde luego, esta importante relación matemática, planteaba un problema cuya solución no era simple. Era un hecho conocido, que la interacción entre dos cuerpos cargados eléctricamente, era inversamente proporcional con la capacidad inductiva del medio y, de manera similar, se sabía que la interacción entre dos polos magnéticos era tanto más débil cuanto más permeable fuera el medio. La permeabilidad magnética se había medido en términos relativos y consecuentemente, existía la dificultad de expresar en una medida estándar a la capacidad inductiva y a la permeabilidad del medio.

El intento de contestar la pregunta ¿cómo medir a la capacidad inductiva y a la permeabilidad magnética del medio, con el mismo conjunto de unidades para poder compararlas? dio lugar a una serie de experimentos que permitieron establecer la equivalencia entre las unidades definidas estáticamente y las dinámicas, dando lugar al surgimiento de unidades electromagnéticas que permitieron, con base en definiciones específicas, encontrar la equivalencia entre las esu (unidades electrostáticas de carga) y las emu (unidades electromagnéticas de carga).

La relación encontrada fue que $c = \frac{1 \text{ esu}}{1 \text{ emu}}$ cuya importancia radica en que establece adecuadamente, la relación entre las propiedades mecánicas que determinan la velocidad de las ondas transversales del mecanismo y una constante c que podía determinarse mediante experimentos electromagnéticos.

Cuando Maxwell comparó su valor calculado de c , con el que antes había sido determinado por Weber, encontró que éste casi coincidía con el valor de la velocidad de la luz en el vacío. **Puede ubicarse en este momento, el nacimiento de la teoría electromagnética de la luz.**

El éxito que tuvo Maxwell con la teoría electromagnética, que desarrolló con base en su modelo mecánico, es incuestionable, logró unificar los aspectos estáticos de la electricidad con los dinámicos, explicitó que la inducción se llevaba a efecto en un tiempo finito, encontró la relación entre corriente eléctrica e intensidad magnética y como logro muy importante, ubica a la luz como una radiación electromagnética.

Sin embargo, su modelo mecánico, difícilmente soportaría un análisis crítico. No explicaba la interacción de la materia con el mecanismo: Los remolinos (con masa y elasticidad), no podían ser penetrados por las partículas eléctricas, sin embargo, cualquier cuerpo neutro eléctricamente, podía atravesar sin dificultad el campo y a su vez, los remolinos podían penetrar los conductores. ¿Cómo podían rozar a las bolas eléctricas y no rozar al resto de la materia componente de los conductores?

Por otro lado, la estructura interna del mecanismo presentaba también dificultades: Si los remolinos tuvieran forma cilíndrica, el contacto con las bolas no sería perfecto, su movimiento difícilmente sería continuo, las bolas oscilarían en un sentido y en otro, perdiendo energía en forma de calor. Maxwell dibujó a los remolinos como hexágonos para suponer que actuaban sobre las bolas eléctricas como correas de transmisión, sin embargo, en su desarrollo de la teoría, consideró a los

remolinos como si fueran fluidos girando circularmente, para poder generar la tensión en las líneas de fuerza, pero ese fluido no puede ser penetrado por las partículas eléctricas.

El modelo era inconsistente, sobre todo, en los aspectos metafísicos, los cuales revestían gran importancia para Maxwell. Sus remolinos se ajustaban claramente a la concepción de Descartes, en tanto que las bolas eléctricas y el vacío se ajustaban a la concepción de Newton. Demostró que la representación de Faraday del campo era adecuada, la dotó de la estructura matemática que hoy conocemos y consideramos correcta, pero hubo de aceptar que dicha concepción de campo tenía que obedecer las leyes de Newton.

Maxwell, entonces, se abocó a desarrollar la teoría electromagnética, al margen del mecanismo que tantos frutos le brindó.

Partió de la suposición de que había un mecanismo, supeditado a las leyes de Newton. No conocía (ni era necesario) la estructura y funcionamiento de dicho mecanismo, sólo tenía una condición a cumplir, esta era que: *"para que sus ecuaciones fueran ciertas, se requería que hubiera energía asociada a cada punto del campo"*. En su publicación posterior al artículo ya citado *On physical lines of force*, Maxwell explica su nueva postura:

"EN ALGUNA OCASIÓN ANTERIOR INTENTÉ DESCRIBIR UN TIPO PARTICULAR DE TENSIÓN Y UN TIPO PARTICULAR DE MOVIMIENTO, DISPUESTOS DE TAL MODO QUE EXPLICARAN LOS FENÓMENOS. EN EL PRESENTE ARTÍCULO NO HAGO NINGUNA HIPÓTESIS DE ESA CLASE; Y AL UTILIZAR TÉRMINOS COMO *MOMENTO ELÉCTRICO* Y *ELASTICIDAD ELÉCTRICA*,.....PRETENDO SÓLO DIRIGIR LA ATENCIÓN DEL LECTOR HACIA FENÓMENOS MECÁNICOS QUE LE AYUDEN A COMPRENDER LOS ELÉCTRICOS. LAS EXPRESIONES DE ESTE TIPO QUE APARECEN A LO LARGO DEL ARTÍCULO HAN DE TOMARSE COMO ILUSTRATIVAS, NUNCA COMO EXPLICATIVAS.

AL HABLAR DE LA ENERGÍA DEL CAMPO, ME GUSTARÍA, NO OBSTANTE, QUE SE ME ENTENDIERA AL PIE DE LA LETRA. TODA ENERGÍA ES LO MISMO QUE ENERGÍA MECÁNICA, YA EXISTA EN FORMA DE MOVIMIENTO O DE ELASTICIDAD O EN CUALQUIER OTRA. LA ÚNICA CUESTIÓN ES: *¿DÓNDE RESIDE?* SEGÚN LAS TEORÍAS ANTIGUAS RESIDE EN LOS CUERPOS ELECTRIZADOS, CIRCUITOS CONDUCTORES E IMANES, EN LA FORMA DE UNA ENERGÍA LLAMADA ENERGÍA POTENCIAL O CAPACIDAD DE PRODUCIR CIERTOS EFECTOS A DISTANCIA. EN NUESTRA TEORÍA, RESIDE EN EL CAMPO ELECTROMAGNÉTICO, EN EL ESPACIO QUE RODEA A LOS CUERPOS ELECTRIZADOS Y MAGNÉTICOS Y TAMBIÉN EN LOS CUERPOS MISMOS. Y RESIDE EN DOS FORMAS DIFERENTES, QUE CABE DESCRIBIR, SIN HACER HIPÓTESIS, COMO POLARIZACIÓN ELÉCTRICA Y POLARIZACIÓN MAGNÉTICA, O BIEN, SEGÚN UNA HIPÓTESIS MUY PROBABLE, COMO EL MOVIMIENTO Y LA TENSIÓN DE UN MISMO MEDIO".⁸⁷

Por el contenido del párrafo anterior, podemos darnos cuenta, que Maxwell decidió continuar desarrollando su teoría, dando importancia a los efectos macroscópicos, para los cuales no era indispensable tener una representación "real" del mecanismo al que antes se hizo alusión. Esta teoría macroscópica tenía capacidad de predicción en los aspectos relacionados con corrientes y cargas, efectos inducidos etcétera., en tanto no pretendiera explicar las interacciones a nivel microscópico.

Las características principales de esta teoría son:

- a) Las magnitudes electromagnéticas se consideran fundamentales.
- b) El campo es una realidad *per se*
- c) La energía reside en todo punto del campo y puede existir en los cuerpos.
- d) Los campos pueden penetrarse mutuamente y es válido el principio de superposición de los efectos.
- e) Materia y campo son entes distintos y pueden penetrarse mutuamente.

⁸⁷ Maxwell, J. *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell*, Vol. I. Dover, N.Y. 1965

Estas características descansan, a final de cuentas, en cuestiones obvias. Las magnitudes que representan a las propiedades carga, corriente, fuerza magnética, fuerza eléctrica, etcétera, pueden ser definidas y/o medidas, sin necesidad de introducir propiedades mecánicas.

Al dotar a los campos de la capacidad de tener energía en cada punto, Maxwell obvió el viejo dilema de "acción instantánea a distancia" o "acción por contigüidad". La fuerza total que actuaba sobre un cuerpo, podía explicarse por la posición y la energía de los cuerpos que lo rodeaban. Sin embargo, dado que Maxwell había demostrado que la interacción electromagnética se realizaba mediante señales, que se desplazaban con velocidad finita. Una perturbación sobre un cuerpo podría ser causada por una radiación originada en el pasado (no importa si reciente o remoto), en cualquier caso, la interacción no podía atribuirse a ningún cuerpo "contemporáneo", eso dejaba como única conclusión lógica que "el campo" era el causante de la acción.

La hipótesis de que la materia y el campo son entes distintos es, en esencia, un rompimiento de Maxwell con la teoría de Faraday ya que adoptó una teoría de la carga y la corriente fundamentada en la idea de campo, pero rechazó la teoría de campos de Faraday referida a la materia.

En su artículo *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field*⁸⁸, publicado en 1865, Maxwell incluyó una tabla con las ecuaciones matemáticas de su teoría, que a continuación se reproduce y cuyo origen ya fue explicado:

Cuadro 4.1	
A. Ecuación de la corriente total	$\vec{T} = \vec{J} + \frac{d\vec{D}}{dt}$
B. Ecuación de la fuerza magnética	$\mu\vec{H} = \vec{\nabla} \times \vec{A}$
C. Ecuación de la corriente eléctrica	$4\pi\vec{T} = \vec{\nabla} \times \vec{H}$
D. Ecuación de la fuerza electromotriz	$\vec{E} = \vec{\nabla} \times \mu\vec{H} - \frac{d\vec{A}}{dt} - \vec{\nabla}\Psi$
E. Ecuación de la elasticidad eléctrica	$\vec{E} = \kappa\vec{D}$
F. Ecuación de la resistencia eléctrica	$\vec{E} = -r\vec{J}$
G. Ecuación de la electricidad libre	$\rho + \vec{\nabla} \cdot \vec{D} = 0$
H. Ecuación de continuidad	$\frac{d\rho}{dt} + \vec{\nabla} \cdot \vec{J} = 0$

En las ecuaciones A a la H, se distinguen dos tipos de variables:

Vectoriales

\vec{T} = corriente total
 \vec{J} = corriente de conducción
 \vec{D} = desplazamiento eléctrico

Escalares

μ = permeabilidad magnética
 Ψ = potencial electrostático
 ρ = densidad volumétrica de carga

⁸⁸ Maxwell, J. (1965). *Obra Citada*

\vec{H} = fuerza magnética

\vec{A} = potencial vector (estado electrotónico)

\vec{E} = fuerza electromotriz

\vec{V} = velocidad del conductor.

κ = recíproco de la constante dieléctrica

r = resistencia del conductor

En el cuadro 4.1 se conservan los nombres que propuso Maxwell, sin embargo, debe hacerse notar que la notación vectorial es debida a Gibbs y Heaviside, introducida después de la muerte de Maxwell, quien escribió tres ecuaciones escalares para cada una de las aquí consignadas, una para cada uno de los ejes cartesianos x, y, z.

A partir de estas ecuaciones e introduciendo la hipótesis de ausencia de conductores y corrientes en el medio, Maxwell encontró, para \vec{H} , la ecuación:

$$\nabla^2 \mu \vec{H} = \left(\frac{4\pi\mu}{\kappa} \right) \frac{d^2 \mu \vec{H}}{dt^2}$$

La cual es una ecuación de onda, misma que era perfectamente conocida en época de Maxwell. Se conocía, que para el caso de ondas planas, la velocidad de propagación de las ondas está dada por $V = \sqrt{\frac{\kappa}{4\pi\mu}}$. Asimismo, Maxwell volvió a demostrar que, para el caso del vacío, $\kappa = 4\pi c^2$,

siendo $c = \frac{1esu}{1emu}$, deduciéndose, que en el vacío $V = c$.

En síntesis, Maxwell había encontrado⁸⁹, usando sólo sus ecuaciones (sin hacer uso del modelo mecánico), que la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas en un medio, depende de la permeabilidad magnética y de la constante dieléctrica del medio y además, demostró que las ondas electromagnéticas eran ondas transversales, siendo las componentes eléctrica y magnética mutuamente perpendiculares, en el caso de un rayo de luz polarizado. También encontró que, en una onda electromagnética la energía asociada con dicha onda, era en promedio, mitad eléctrica y mitad magnética.

⁸⁹ Maxwell, J. (1965). Obra Citada

b). Consecuencias de la teoría de Maxwell

En el año de 1873, en que Maxwell hizo su publicación "A Treatise on Electricity and Magnetism"⁹⁰, ya se le consideraba como el científico más importante en lo que respecta al desarrollo de la teoría de campos, cuyo origen se debe fundamentalmente a Faraday; podemos entonces afirmar, con justeza, que ambos son los artifices del esquema físico filosófico que conocemos como la teoría del campo electromagnético y por lo tanto, ambos son las figuras predominantes en el fenómeno que Kuhn⁹¹ denomina "revolución científica", sin embargo, cabe preguntarnos ¿la teoría electromagnética de Maxwell se había consolidado como un paradigma?, ¿sus postulados teóricos y los resultados experimentales eran concordantes entre sí y a la vez, contradecían a los establecidos y obtenidos bajo el esquema del paradigma anterior?.

Los puntos de controversia entre la teoría de Faraday-Maxwell y la de los seguidores de Newton son, fundamentalmente, las referentes a la concepción del universo. Newton postuló que existían tres elementos fundamentales: los corpúsculos, el vacío y las fuerzas, en tanto que Faraday concebía que no existía el vacío y que la única sustancia del universo eran las fuerzas, negaba que las fuerzas pudieran actuar instantáneamente a distancia, por el contrario afirmaba que las fuerzas llenaban totalmente al universo y que como actuaban por contigüidad, entonces la acción tendría que tomar un tiempo y no podía ser instantánea.

La teoría de campos que Maxwell formuló, con base en las ideas de Faraday, constituyó una síntesis de conceptos que abarcaban múltiples campos de conocimiento; es una síntesis que sólo podemos comparar con la realizada por Isaac Newton⁹², la teoría de Maxwell integró tanto resultados teóricos como hechos experimentales, es una teoría cuya validez, casi de manera generalizada, puede establecerse de manera independiente, es decir, no requiere ser validada por otros esquemas teóricos. Sin embargo, el hecho de que la teoría de Maxwell diera una explicación del comportamiento de la luz (lo que sí era contrastable con otras teorías), así como la correspondencia entre sus postulados y los resultados experimentales obtenidos en las investigaciones sobre electricidad y magnetismo, hicieron rápidamente de la teoría de Maxwell, un punto de partida y de convergencia de los programas de investigación de la época.

Desde luego, la teoría de Maxwell tuvo detractores y seguidores. Las actitudes iban del rechazo total a la aceptación absoluta, pasando por muchas posiciones intermedias. Quienes rechazaban la teoría sólo pudieron mantener esa actitud hasta el año de 1889 en que Hertz⁹³ publicó los resultados de su investigación, misma que culminó con la demostración experimental del comportamiento de la luz, como un fenómeno electromagnético, en concordancia total con la teoría de Maxwell.

Para los científicos de la época en que se publicó la teoría de Maxwell, existían algunos aspectos (enigmas, según los concibe Kuhn) que deberían ser estudiados con el objetivo de hacer a la teoría coherente internamente, o bien, con el objetivo de rechazarla. Entre otros puntos importantes, podemos destacar los siguientes, por considerarlos los más significativos:

¿Cómo es el campo electromagnético producido por una carga eléctrica en movimiento?

⁹⁰ Maxwell, J. (1954) Obra Citada.

⁹¹ Kuhn, T. (1971). Obra Citada

⁹² Newton, I. (1982). Obra Citada

⁹³ Shamos, M. (1959) .Obra Citada

¿Cuál es el comportamiento del campo electromagnético en el caso de una corriente oscilante?

¿Qué perturbaciones produce en el campo electromagnético el movimiento de la materia común a través del éter?

¿Cómo interactúa el campo electromagnético con la carga y con la corriente?

Para encontrar la relación de las cargas en movimiento, con el campo electromagnético, J. Thomson, consideró cargas que se desplazaban con velocidad constante (velocidades pequeñas comparadas con la velocidad de la luz), hizo la hipótesis de que los efectos del campo magnético variable, sobre el campo eléctrico, eran despreciables, de manera tal que entonces, el campo eléctrico producido por una carga en movimiento, era simétrico alrededor de la carga. Procediendo de esta manera, pudo calcular los potenciales vectoriales debidos a las corrientes de desplazamiento, lo que le permitió encontrar una relación matemática para el campo magnético, misma que expresó de la siguiente forma:

$$\vec{H} = \left(\frac{1}{c}\right) \vec{V} \times \vec{E}$$

En la cual, \vec{H} representaba al campo magnético, \vec{V} la velocidad de la partícula cargada y \vec{E} el campo eléctrico.

G. F. Fitzgerald (1851-1901), analizó los trabajos de Thomson e hizo la observación de que el resultado obtenido era correcto, sin embargo, juzgó que el método de cálculo era equivocado puesto que una carga en movimiento constituye, necesariamente, una corriente de conducción, condición indispensable para que al considerarla junto con la corriente de desplazamiento, se logre que la corriente total sea cerrada. Al considerar el movimiento de una carga como una corriente de conducción, fue posible calcular los campos tanto eléctrico como magnético, incluyendo los efectos que la variación del campo magnético hace sobre el campo eléctrico (mismos que despreció Thomson). Con la corrección de Fitzgerald, Oliver Heaviside realizó el cálculo del campo electromagnético de una carga en movimiento, encontrando la misma expresión que Thomson⁹⁴.

Para continuar haciendo el análisis de las consecuencias de la teoría de Maxwell, resulta muy conveniente, en este momento, hacer una relatoria de una contribución muy importante, que ocurre en el año de 1870 (tres años antes de la publicación del escrito de Maxwell "A treatise on Electricity and Magnetism"). Hermann Von Helmholtz publicó un artículo titulado *Sobre las ecuaciones de movimiento de la electricidad para cuerpos conductores en movimiento*⁹⁵. En este artículo, Helmholtz se propuso encontrar una "teoría general" de la inducción electromagnética que armonizara con los principios físicos y filosóficos de Newton. No está de sobra, aclarar que Helmholtz conocía con profundidad las teorías de Maxwell, Weber, Ampere, Grassman y Neumann. Sabía que todas ellas eran coincidentes en sus resultados cuando consideraban corrientes eléctricas cerradas y diferían entre sí, cuando consideraban corrientes abiertas.

⁹⁴ Jeans, J. (1966) Obra Citada.

⁹⁵ Helmholtz. Wiss Abhandl, Vol. 1. P. 545. Citado en Berkson, W. (1985). Obra Citada

Para discernir entre estas teorías, hizo un análisis que se basaba en construir potenciales (similares a los de Neumann), con la condición de que dichos potenciales hicieran que al aplicar su teoría y considerando ya el principio de conservación de la energía, que él mismo había establecido, se obtuvieran resultados concordantes con la teoría de Ampere, para el caso de corrientes cerradas.

Encontró la expresión matemática para el potencial que una corriente hace en el punto en que se encuentra otra corriente, que a continuación se incluye:

$$P = \left[\frac{ij}{4r} \right] [(1+k) \cos(D_s, D_\sigma) + (1-k) \cos(r, D_s) \cos(r, D_\sigma)]$$

Ecuación en la que:

D_s, D_σ son los elementos de corriente con intensidades i y j , respectivamente.

r es la distancia de separación entre los elementos de corriente y

k es una constante arbitraria que puede tomar los valores, $-1, 0$ y $+1$.

La constante k que aparece en la expresión de Helmholtz juega un papel primordial en la teoría ya que si:

$k = -1$, la expresión concuerda con la teoría de Weber de la inducción.

$k = 0$, la fórmula concuerda con la teoría de Maxwell de la inducción.

$k = +1$, la relación matemática es concordante con la teoría de Neumann.

Conjugando los resultados obtenidos, con su principio de conservación de la energía, encontró que las corrientes, en el caso de la teoría de Weber, tenían asociada una energía cinética negativa, lo que le permitió rechazarla categóricamente

Para analizar la teoría de Maxwell, tuvo que ampliar su propia teoría, para incluir un medio que fuera tanto dieléctrico como diamagnético y que se suponía, llenaba el espacio (el éter).

Con respecto al éter, Helmholtz adoptó una postura absolutamente neutra entre las concepciones de Faraday, Newton, Maxwell y Poisson. Para aclarar este comportamiento, es adecuado insertar a continuación, la traducción que hace Berkson⁹⁶ del escrito de Helmholtz "Wiss Abhandl Vol.1":

"EN LOS PRIMEROS (PÁRRAFOS DE LA SIGUIENTE OBRA) SE CONSIDERA QUE LAS ACCIONES ELECTROSTÁTICAS Y ELECTRODINÁMICAS SON PURAS ACCIONES A DISTANCIA, EN LAS QUE EL MEDIO AISLANTE INTERPUESTO NO SUFRE NI EJERCE EFECTOS; ÉSTA HA SIDO, AL MENOS EN EL CONTINENTE, LA POSTURA QUE HAN MANTENIDO LA MAYORÍA DE LOS FÍSICOS MATEMÁTICOS. NO OBTANTE, POR LOS DESCUBRIMIENTOS DE FARADAY SABEMOS HOY QUE LA MAYORÍA DE LOS MEDIOS MATERIALES SON MAGNETIZABLES....LA TEORÍA MÁS ELEMENTAL DEL DIAMAGNETISMO SE OBTIENE AL SUPONER QUE EL ÉTER LUMINOSO QUE LLENA EL ESPACIO ES MAGNETIZABLE, ADMITIENDO A LA VEZ (LO CUAL NO ES IMPROBABLE) LA POSIBILIDAD DE CONSIDERARLO COMO UN DIELECTRICO, EN EL SENTIDO DE FARADAY.

LA TEORÍA DE FARADAY, A LA QUE CLERK MAXWELL HA DADO EXPRESIÓN MATEMÁTICA..., NIEGA LA EXISTENCIA DE LA ACCIÓN A DISTANCIA, PROPONIENDO EN SU LUGAR UNA ACCIÓN QUE SE TRANSMITE POLARIZANDO PROGRESIVAMENTE EL MEDIO [NO OBTANTE

⁹⁶ Berkson, W. (1985) Obra citada.

LAS TEORÍAS DE MAXWELL Y DE POISSON] EN CIERTA MEDIDA SE CONTRADICEN, YA QUE SEGÚN LA TEORÍA DE POISSON DE LA INDUCCIÓN MAGNÉTICA, QUE SE PUEDE APLICAR DE MANERA PERFECTAMENTE SIMILAR A LA POLARIZACIÓN DIELECTRICA, LA ACCIÓN A DISTANCIA DISMINUYE CON EL AUMENTO DE LA POLARIZACIÓN, MIENTRAS QUE PARA MAXWELL ES PRECISAMENTE LA POLARIZACIÓN DEL MEDIO LO QUE HACE POSIBLE LA ACCIÓN A DISTANCIA.

LA TEORÍA DE MAXWELL HA SUMINISTRADO EL NOTABLE RESULTADO DE QUE LAS PERTURBACIONES ELÉCTRICAS SE PROPAGAN EN LOS DIELECTRICOS EN FORMA DE ONDAS TRANSVERSALES, CUYA VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN ES LA VELOCIDAD DE LUZ c . DEBIDO A LA ENORME IMPORTANCIA QUE PUEDE TENER ESTE RESULTADO PARA EL ULTERIOR DESARROLLO DE LA FÍSICA, Y DADO QUE LA CUESTIÓN DE LA VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE LOS EFECTOS ELÉCTRICOS HA ADQUIRIDO GRAN INTERÉS EN ÉPOCA RECIENTE, PARECE IMPORTANTE INVESTIGAR LO QUE RESULTA DE MI LEY DE INDUCCIÓN GENERALIZADA EN EL CASO DE MEDIOS MAGNETIZABLES Y DIELECTRICAMENTE POLARIZABLES".

Después de realizar su análisis, Helmholtz concluyó:

Si la constante k era igual con cero, sus resultados coincidían con la teoría de Maxwell.

En el caso de que la constante k fuera diferente de cero, las velocidades de las ondas eléctricas resultarían diferentes de las velocidades de las ondas magnéticas.

Si el medio opusiera alguna resistencia a ser polarizado, además de las ondas transversales predichas por Maxwell, se obtendrían ondas longitudinales.

Por tanto, la resistencia del medio a la polarización debería ser idénticamente cero.

Los trabajos de Helmholtz zanjaron contundente y definitivamente, la controversia, con respecto a los fenómenos electromagnéticos, entre los defensores de la teoría de Weber (filosofía de Newton) y los seguidores de la teoría de Maxwell (filosofía de Faraday).

Como una consecuencia lógica del resultado obtenido por Helmholtz, su prestigio se acrecentó y logró influir en las concepciones y en los programas de investigación de varios científicos jóvenes de la época, entre los cuales se encontraban : W. Roetgen (1845-1923), H.A. Lorentz (1853-1928) y Heinrich Hertz (1857-1894), este último científico realizó una serie de experimentos cuyas conclusiones resultaron de gran importancia para la confirmación de la teoría de Maxwell y es por ello que se consideró adecuado incluir algunos datos biográficos y una breve descripción de sus experimentos:

Heinrich Rudolf Hertz nació en Hamburgo, Alemania, el 22 de febrero de 1857, su padre fue abogado y senador por la ciudad de Hamburgo; heredó de su padre un gran interés por las humanidades, estudió varias lenguas y, desde luego, siempre estuvo interesado en la ciencia. Recibió educación en escuelas privadas hasta los 15 años, edad a la que decidió continuar sus estudios con un tutor, debido a que en las escuelas de su época se hacía más énfasis en las asignaturas prácticas que en las clásicas (teóricas). A los 17 años ingresó al *Gelehrtenschule* (escuela de maestrias), en Hamburgo en donde permaneció hasta obtener su diploma en 1875. A continuación hizo un año de práctica en una firma de ingeniería, al cabo del cual decidió ingresar a la Escuela Técnica de Dresden. Seis meses después de su ingreso, fue llamado al servicio militar por el periodo de un año. Cuando terminó su servicio militar obligatorio, ingresó a la universidad de Munich a estudiar matemáticas y mecánica, allí permaneció hasta cumplir los 21 años, en 1878, fecha en que fue transferido a la universidad de Berlín, a estudiar bajo la dirección de Helmholtz y Gustav Kirchhoff (1824-1887). En esta universidad fue galardonado con un premio por su primera investigación independiente que se refería a la publicación de un artículo sobre la inercia de la electricidad. Recibió de la universidad de Berlín, su doctorado

magna cum laude en 1880, con una disertación sobre inducción en esferas que se mantenían en movimiento de giro.

En 1883 dejó Berlín y se integró a la Universidad de Kiel, como docente de física teórica

En el año de 1879, la Academia Prusiana de Ciencias, ofreció un premio para quien resolviera el problema experimental de encontrar la relación existente entre la fuerza electromagnética y la polarización de los dieléctricos, es decir, demostrar que la polarización de un dieléctrico producía fuerzas electromagnéticas o bien, demostrar que una fuerza electromagnética producía polarización en un dieléctrico. Helmholtz le planteó el problema a Hertz y le ofreció ayuda del Instituto de Física de Berlín, si aceptaba abordarlo. Es oportuno señalar que el establecimiento del premio ocurrió debido a sugerencias hechas ante el comité por el propio Helmholtz y que, el ofrecimiento de ayuda a Hertz, se sustentaba en el hecho de que Helmholtz, quien fue tutor académico de Hertz, consideraba que Hertz tenía los conocimientos y la pericia experimental para lograr la solución. Sin embargo, luego de pensarlo cuidadosamente Hertz declinó el intentar resolver dicho problema pues consideraba que las dificultades experimentales eran muy grandes, debido primordialmente a la poca sensibilidad de los instrumentos de medición de la época.

Después de casi ocho años de haber declinado el resolver el problema, en la primavera de 1886, al trabajar con las “espirales de Knochenhaver”, con fines didácticos de explicar el fenómeno de inducción electromagnética, Hertz se dió cuenta de que no se requería usar grandes pilas para obtener chispas en el carrete secundario. En su escrito Hertz anota⁹⁰:

“OBSERVÉ CON SORPRESA QUE NO HACÍA FALTA DESCARGAR GRANDES PILAS A TRAVÉS DE UNA DE ESTAS ESPIRALES PARA PODER OBTENER CHISPAS EN LA OTRA; QUE BASTABAN PEQUEÑAS BOTELLAS DE LEYDEN PARA ESTE PROPOSITO, O INCLUSO, LA DESCARGA DE UN PEQUEÑO CARRETE DE INDUCCION, SIEMPRE QUE TUVIERA QUE SALTAR A TRAVÉS DE UN ESPINTERÓMETRO.”

En el año de 1889, Hertz publicó los resultados de sus experimentos, en los que:

- ❖ Demostró que los efectos electromagnéticos se propagaban a través del espacio.
- ❖ Midió la rapidez de propagación de las ondas electromagnéticas.
- ❖ Midió la longitud de onda de las ondas electromagnéticas.
- ❖ Demostró, mediante experimentos de reflexión, refracción y polarización que las ondas electromagnéticas eran ondas transversales.

Con los resultados obtenidos por Hertz, la teoría de Maxwell, que aun no contaba con la aceptación generalizada, se convirtió, en un tiempo muy breve, en el punto de partida de todos los estudios posteriores sobre electricidad y magnetismo (y por tanto, del espacio y la materia).

Los experimentos de Hertz, además de validar la teoría electromagnética de Maxwell, dieron origen a desarrollos tecnológicos cuyo impacto aun perdura: Telegrafía inalámbrica, radio, televisión, etcétera.

Volvamos al conjunto de enigmas que se considera, revisten importancia para esta tesis:

¿Cómo es el campo electromagnético producido por una carga eléctrica en movimiento?

⁹⁰ Traducción de D. E. Jones. *Electric Waves* by Heinrich Hertz. London MacMillan. 1900.

¿Cuál es el comportamiento del campo electromagnético en el caso de una corriente oscilante?

¿Cómo interactúa el campo electromagnético con la carga y con la corriente?

¿Qué perturbaciones produce en el campo electromagnético el movimiento de la materia común a través del éter?

El intento de explicar el fenómeno de arrastre del éter por la materia común moviéndose en su seno fue abordado por H. A. Lorentz, quien hizo la hipótesis de que “la materia común, en movimiento, no perturba al éter”, hipótesis que se contraponía con la de H. Hertz, quien en su estudio sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento afirma que “el éter se mueve junto con la materia común”.

El problema que Lorentz pretendía resolver, venía de épocas anteriores, pero el triunfo de la teoría de Maxwell, lo dotaba de actualidad e importancia. En forma llana podemos plantear el problema de la siguiente manera: Cuando la materia cargada se mueve a través del espacio ¿cómo se comportan las líneas de fuerza?, ¿se mueven con la partícula?, ¿se quedan atrás?, ¿son arrastradas por el éter?. Cuando la materia común (eléctricamente neutra) se mueve en una región en donde hay líneas de fuerza ¿modifica a las líneas de fuerza?, ¿las arrastra?

El fenómeno mediante el cual se podía asociar el movimiento de la tierra a través del éter fue puesto de manifiesto por James Bradley (1693-1762) en el año de 1728 y que se refiere a la variación del ángulo al que tenía que orientarse un telescopio para observar la misma estrella en invierno y en verano, puesto que la tierra se mueve en direcciones contrarias con respecto a la estrella. Al fenómeno se le dió el nombre de “aberración estelar”.

Explicar la aberración estelar desde la perspectiva de la teoría de Newton, no tenía problema; pero, explicarla desde una teoría que considerara la existencia del éter, revestía grandes problemas. Fresnell hizo la suposición de que el éter no se movía con la materia y así, el fenómeno de la aberración se podía explicar mediante la teoría de Newton. La teoría de Fresnell fue refutada por Arago quien ensayó a medir la aberración usando un prisma en movimiento. Fresnell, al conocer el cuestionamiento de Arago, hizo una nueva hipótesis, para incluir las observaciones de Arago y postuló que el movimiento del prisma “arrastraba a la luz” y no al éter. Definió un coeficiente de arrastre en función del índice de refracción del medio. Este coeficiente de arrastre de Fresnell también podía obtenerse considerando que una parte del éter cercano al prisma se condensaba y se movía junto con el prisma y en el año 1851 Fizeau (1819-1896) realizó un experimento cuyos resultados “confirmaban” la existencia del coeficiente de Fresnell.

Stokes (1819-1903) supuso que la tierra, en su movimiento, arrastraba al éter cercano, de modo que la velocidad del éter en la superficie de la tierra, era la misma que la de la tierra e iba disminuyendo según se consideraran puntos más lejanos; esta teoría de Stokes coincidía (o confirmaba) los supuestos de Arago, pero entraba en contradicción con la teoría de Fresnell.

En el año de 1892, H. A. Lorentz publicó un trabajo titulado⁹⁸ “La teoría electromagnética de Maxwell y su aplicación a los cuerpos en movimiento”. En este estudio Lorentz se propuso explicar

⁹⁸ Lorentz, H.A., *“La Théorie Electromagnétique de Maxwell et son Application aux corps Mouvants”*. Collected Papers.

el coeficiente de arrastre de Fresnell y el fracaso de los experimentos que se proponían para medir el movimiento del éter y, para ello, propuso que todos los cuerpos cargados contenían partículas minúsculas cargadas, que obedecían las ecuaciones de Maxwell, en un éter en perfecto reposo.

Como puede observarse, Lorentz propuso la existencia de partículas pequeñas cargadas, que son las constituyentes de los cuerpos cargados y que no son otra cosa que lo que después J. J. Thomson denominó “electrones”.

Los resultados del trabajo de Lorentz fueron notables, obtuvo cinco ecuaciones sencillas que explicaban el comportamiento de los cuerpos cargados en movimiento. En sus propias palabras:

“ ESTAS FÓRMULASEXPRESAN POR UN LADO LOS CAMBIOS QUE SE PRODUCEN EN EL ÉTER POR LA PRESENCIA Y EL MOVIMIENTO DE LOS CORPÚSCULOS CARGADOS Y POR OTRO LADO DAN A CONOCER LA FUERZA CON QUE ACTÚA EL ÉTER SOBRE CUALQUIERA DE LAS PARTÍCULAS. SI ESTA FUERZA DEPENDE DEL MOVIMIENTO DE LAS DEMÁS PARTÍCULAS, ES PORQUE EL MOVIMIENTO HABÍA MODIFICADO EL ESTADO DEL ÉTER Y EL VALOR DE LA FUERZA EN UN CIERTO INSTANTE NO VIENE DETERMINADO POR LA VELOCIDAD Y ACCELERACIONES QUE POSEEN LOS CORPÚSCULOS EN ESE MOMENTO SINO QUE DEPENDE DE LOS MOVIMIENTOS QUE YA HAN TENIDO LUGAR. EN TÉRMINOS GENERALES SE PUEDE DECIR QUE LOS FENÓMENOS SUSCITADOS EN EL ÉTER POR EL MOVIMIENTO DE UNA PARTÍCULA ELECTRIZADA SE PROPAGA CON VELOCIDAD IGUAL A LA DE LUZ”

Las ecuaciones que Lorentz incluyó en su artículo son las siguientes:

$$\bar{\nabla} \cdot \bar{F}_E = \rho$$

$$\bar{\nabla} \cdot \bar{F}_M = 0$$

$$\bar{\nabla} \times \bar{F}_M = \left(\frac{1}{c} \right) \left[\frac{d\bar{F}_E}{dt} + \rho \bar{V} \right]$$

$$\bar{\nabla} \times \bar{F}_E = - \left(\frac{1}{c} \right) \left[\frac{d\bar{F}_M}{dt} \right]$$

$$\bar{f} = \bar{F}_E + \left(\frac{1}{c} \right) [\bar{V} \times \bar{F}_M]$$

En las que:

ρ = densidad de carga.

\bar{F}_M = fuerza magnética.

\bar{F}_E = fuerza eléctrica.

\bar{V} = velocidad de la carga.

\bar{f} = fuerza de Lorentz.

c = velocidad de la luz.

Los intentos de explicar el éter.

La teoría de las partículas cargadas de Lorentz, surgió del intento de comprender el éter, al que se pretendía caracterizar mecánicamente explicando algunos fenómenos como la luz, la interacción eléctrica o la inducción magnética, o bien, se intentaba interpretar el fenómeno del arrastre del éter por la materia común que se desplazaba en su seno.

Explicar mecánicamente al éter no era imprescindible dado que se contaba con la teoría de Maxwell que, como ha sido expuesto en esta tesis, proporcionaba una interpretación clara de las acciones eléctricas y magnéticas en un punto cualquiera del espacio, independientemente a cualquier otra explicación más profunda que pudieran tener esas fuerzas. Sin embargo, el problema del “arrastre del éter” no podía obviarse dado que las ecuaciones de Maxwell eran válidas para el éter puesto que las fuerzas eléctricas y magnéticas, independientemente de su naturaleza, residían en el éter y por lo tanto, los campos producidos por las cargas y corrientes, dependerían de si el éter se movía o permanecía en reposo.

Se intentó explicar al éter de diversas maneras, pero podríamos separar los esfuerzos, en dos grupos diferenciados claramente:

1. Los que consideraban el éter como un "fluido perfecto"
2. Los que consideraban al éter como un medio con propiedades de sólido elástico.

De los diferentes ensayos a los que se refiere Whittaker⁹⁹, destacamos:

1.- La teoría de James Challis (1803-1882), célebre clérigo y astrónomo inglés, que partió de considerar como analogía al comportamiento de una partícula en el seno de un fluido en reposo, por el que se envían ondas y la explicación del movimiento de la partícula en función de la longitud de onda, pero nunca lo aplicó a algún caso concreto..

2.- La teoría de las esferas pulsantes, propuesta por William Thomson, en la que propuso esferas en el seno de un fluido incompresible, que vibraban con una "frecuencia universal", con la que estableció que las interacciones entre partículas obedecían la relación del inverso cuadrado tanto para las atracciones como para las repulsiones, explicó la existencia de partículas con carga positiva, negativa o neutras, pero la teoría mostró fallas puesto que, para que fuera consistente internamente, era necesario que la velocidad de propagación de las ondas fuera infinita, además de que, su sistema no cumplía el principio de conservación de la energía.

3.- La teoría del éter similar a un sólido elástico, también postulada por William Thomson, basada en las teorías ondulatorias de Young y Fresnell, que falla porque predice ondas longitudinales además de las transversales.

4.- La teoría del éter rotacionalmente elástico, propuesta por James MacCullagh (1809-1847), quien postulaba que este éter no ofrecía resistencia a la compresión, pero se comportaba como un sólido elástico cuando se le aplicaban torcas.

5.- La teoría del éter considerado como un fluido imaginario, propuesta por Karl Pearson (1857-1936), que no cumplía con el principio de conservación (del fluido), puesto que en las cargas positivas debería crearse el fluido y en las negativas, debería aniquilarse.

6.- La teoría de Maxwell, que ya ha sido tratada en este escrito y que fue la única que propuso ecuaciones que explicaban las interacciones eléctricas y magnéticas pero que, sin embargo, no se aceptaba plenamente dado que, hacía uso de la "interpretación operativa".

Como es evidente, sólo se mencionaron, algunos formalismos que pretendieron explicar al éter y para algunas de estas teorías hubo modificaciones importantes, por ejemplo, la de MacCullagh fue modificada por Fitzgerald (1851-1901), posteriormente por Kelvin y finalmente por Joseph Larmor (1857-1942). Asimismo, a la teoría de W. Thomson, de las esferas pulsantes le fueron hechas algunas variantes por el matemático noruego Carl Antón Bjerknes (1825-1903) y otros.

⁹⁹ Whittaker, E. *History of the theories of Aether and Electricity*. Arper Torchbooks. New York. 1960.

De todas las teorías mencionadas, ninguna fue capaz de identificar a las fuerzas eléctricas y magnéticas con las supuestas propiedades mecánicas del éter.

Lo que resulta destacable de esta muy breve reseña de la búsqueda de explicar el éter, es que todos los teóricos de los campos (desde Descartes hasta Lorentz) concibieron al campo como una sustancia física, dotada de propiedades bien definidas, que se conservaban aun durante los cambios (continuos), en el espacio y en el tiempo.

Surgió entonces una nueva concepción de campo, creada para explicar la gravitación; esta idea está basada en la suposición de que existe una curvatura del espacio. Rompe esta teoría con las concepciones de campo de Faraday, rechaza asimismo la posibilidad de acción instantánea a distancia (mecánica de Newton) y, al considerar a la materia como una sustancia con propiedades puramente geométricas, acepta de manera tácita las ideas de Descartes. El creador de esta teoría, fue Albert Einstein.

Al parecer, las ideas de Einstein surgieron del intento de conciliar la teoría de Maxwell con los resultados de la mecánica estadística.

Max Planck (1858-1947) afirmó en el año de 1900 que una solución al problema de encontrar la relación entre la temperatura de un cuerpo y la longitud de la onda de luz emitida cuando se ponía incandescente, podría obtenerse si se suponía que la luz sólo podía emitirse o absorberse en ciertos niveles de energía, múltiplos de una constante muy pequeña "h", que en la actualidad recibe el nombre de constante de Planck.

Einstein postuló en el año de 1905 que la luz, desde que se emite hasta que se absorbe viaja en paquetes discretos, postulado que estaba en franca oposición a la teoría de Maxwell que afirmaba que la luz era una onda electromagnética.

Las ideas de Einstein con respecto a las teorías de Newton y Maxwell eran que, ambas deberían ser reformuladas y para ello, propuso el principio de relatividad y partiendo de éste, dedujo las condiciones a las que tendría que sujetarse cualquier teoría. En particular, lo hace para la teoría de Lorentz.

Los supuestos fundamentales de Einstein fueron:

- ❖ Ni el espacio absoluto ni el éter de Lorentz forman parte de la verdadera imagen del mundo.
- ❖ La luz se propaga siempre por el espacio vacío con una velocidad bien definida $\langle c \rangle$ que es independiente del estado de movimiento del cuerpo emisor.
- ❖ Sucesos distantes que son simultáneos en un sistema no lo son en otro, que esté en movimiento relativo.
- ❖ Para la sincronización de dos relojes en sistemas que se encuentran en movimiento relativo, el tiempo necesario para que una señal se traslade del primer reloj al segundo es el mismo que del segundo al primero.

Con estos supuestos, Einstein construyó una transformación temporal y a partir de ella, dedujo las transformaciones espaciales, llegando precisamente a los mismos resultados obtenidos por Lorentz.

La nueva teoría de campos de Einstein se basaba entonces en dos principios fundamentales:

- ❖ El principio de relatividad y
- ❖ La constancia de la velocidad de la luz.

Al aplicar sus transformaciones (que son las de Lorentz) encontró que los efectos de contracción de la longitud, variación de masa, variación de ímpetu, etcétera, eran exactamente iguales para dos sistemas en movimiento relativo. Concluyendo que *no hay ningún sistema (estacionario) privilegiado en el éter.*

Un resultado teórico obtenido por Einstein, que debe resaltarse, fue que al aplicarse dos transformaciones sucesivas de Lorentz, se obtenía también, una transformación de Lorentz y, la aplicación de la inversa de una transformación de Lorentz era una transformación de Lorentz, lo que implicaba que, *la velocidad del éter es indetectable.*

En el ya famoso artículo *el principio de relatividad*, Einstein explicó¹⁰⁰:

"EL PRINCIPIO DE RELATIVIDAD Y LA CONSTANCIA DE LA VELOCIDAD DE LA LUZ BASTAN PARA OBTENER UNA TEORÍA SENCILLA Y CONSISTENTE DE LA ELECTRODINÁMICA DE LOS CUERPOS EN MOVIMIENTO BASADA EN LA TEORÍA DE MAXWELL PARA CUERPOS ESTACIONARIOS. LA INTRODUCCIÓN DE UN ÉTER LUMINÍFERO SE MOSTRARÁ SUPERFLUA EN LA MEDIDA EN QUE LA VISIÓN QUE QUEREMOS DESARROLLAR, NO EXIGE LA EXISTENCIA DE UN «ESPACIO ABSOLUTAMENTE ESTACIONARIO» DOTADO DE PROPIEDADES ESPECÍFICAS, NI LA ASIGNACIÓN DE UN VECTOR VELOCIDAD AL PUNTO DEL ESPACIO VACÍO EN EL QUE TIENEN LUGAR LOS PROCESOS ELECTROMAGNÉTICOS."

Más tarde, tras haber publicado su trabajo sobre la teoría general de la relatividad, afirmó que:

"EL ESPACIO POSEE CUALIDADES FÍSICAS; EN ESTE SENTIDO, POR LO TANTO, EXISTE UN ÉTER. DE ACUERDO CON LA TEORÍA GENERAL DE LA RELATIVIDAD ES IMPENSABLE EL ESPACIO SIN ÉTER, PORQUE EN TAL ESPACIO NO SÓLO NO SE PROPAGARÍA LA LUZ, SINO QUE SERÍA IMPOSIBLE LA EXISTENCIA DE PATRONES DE ESPACIO Y TIEMPO Y NO HABRÍA POR TANTO, INTERVALOS ESPACIO TEMPORALES EN SENTIDO FÍSICO. PERO ESTE ÉTER NO PUEDE CONCEBIRSE DOTADO DE LA CUALIDAD CARACTERÍSTICA DE LOS MEDIOS PONDERABLES, COMO SI ESTUVIERA CONSTITUIDO POR PARTES QUE PODEMOS SEGUIR A TRAVÉS DEL TIEMPO. LA IDEA DE MOVIMIENTO NO PUEDE APLICARSE A ÉL."¹⁰¹

Entre los resultados obtenidos por Einstein con su teoría de la relatividad, podemos destacar, en sus propias palabras¹⁰²: "...LA TEORÍA DE LA RELATIVIDAD (ESPECIAL) HA NACIDO DE LA ELECTRODINÁMICA Y DE LA ÓPTICA. EN ESTOS CAMPOS NO HA MODIFICADO MUCHO LOS ENUNCIADOS DE LA TEORÍA, PERO HA SIMPLIFICADO NOTABLEMENTE EL EDIFICIO TEÓRICO, ES DECIR, LA DERIVACIÓN DE LAS LEYES Y, LO QUE ES MÁS IMPORTANTE, HA REDUCIDO MUCHO EL NÚMERO DE HIPÓTESIS INDEPENDIENTES SOBRE LAS QUE DESCANSA LA TEORÍA. A LA TEORÍA DE MAXWELL-LORENTZ LE HA CONFERIDO UN GRADO TAL DE EVIDENCIA, QUE AQUELLA SE HABRÍA IMPUESTO CON CARÁCTER GENERAL ENTRE LOS FÍSICOS AUNQUE LOS EXPERIMENTOS HUBIESEN HABLADO MENOS CONVINCIENTEMENTE A SU FAVOR.....", MÁS ADELANTE SEÑALA, EN REFERENCIA A LA MASA Y LA ENERGÍA, "...EL RESULTADO MÁS IMPORTANTE DE ÍNDOLE GENERAL AL QUE HA CONDUCIDO LA TEORÍA DE LA RELATIVIDAD ESPECIAL CONCIERNE AL CONCEPTO DE MASA. LA FÍSICA PRERELATIVISTA CONOCE DOS PRINCIPIOS DE CONSERVACIÓN DE IMPORTANCIA FUNDAMENTAL, EL DE CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA Y EL DE LA CONSERVACIÓN DE LA MASA; ESTOS DOS PRINCIPIOS FUNDAMENTALES APARECEN COMPLETAMENTE INDEPENDIENTES UNO DEL OTRO. LA TEORÍA DE LA RELATIVIDAD LOS FUNDE EN UNO SOLO..... SE PUEDE INFERIR RIGUROSAMENTE, MEDIANTE CONSIDERACIONES RELATIVAMENTE SENCILLAS QUE: UN CUERPO QUE SE MUEVA CON VELOCIDAD v Y QUE ABSORBA LA ENERGÍA E_0 EN FORMA DE RADIACIÓN, SIN VARIAR POR ESO SU VELOCIDAD, EXPERIMENTA UN CAMBIO DE ENERGÍA. EL CUERPO TIENE ENTONCES LA MISMA ENERGÍA QUE OTRO DE VELOCIDAD v Y MASA $m + (E_0/c^2)$. CABE POR TANTO DECIR: SI UN CUERPO ABSORBE LA ENERGÍA E_0 , SU MASA CRECE EN (E_0/c^2) . LA MASA INERCIAL DE UN CUERPO NO ES UNA CONSTANTE, SINO VARIABLE, SEGÚN LA MODIFICACIÓN DE SU ENERGÍA....."

¹⁰⁰ Holton, G. "Resource Letter SRT-1 On Special Relativity Theory" Am. Jour. Phys. 30, 462 (1962)

¹⁰¹ Einstein, A. and Infeld, *The Evolution of Modern Physics*. Simon and Schuster. New York. 1938.

¹⁰² Einstein, A. *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*. Altaya. Madrid. 1998.

Las concepciones de Einstein respecto a la materia y el campo pueden resumirse en algunas declaraciones:

No sólo la materia ordinaria puede transformarse en energía radiante, sino que esta energía radiante lleva asociada una masa de valor E/c^2 , es decir: *la masa y la energía son esencialmente iguales; son expresiones diferentes para una misma cosa.*

El campo posee masa y por tanto, el campo es tan material como la masa ordinaria.

Como podemos ver, las concepciones de Einstein difieren de las de Michael Faraday en dos aspectos fundamentales:

Faraday supone un campo *lleno de fuerzas* y Einstein concibe un *espacio curvo*.

El campo de Faraday es sustancial, en él la propiedades están definidas y se conservan. Einstein niega la conservación y la unicidad de las propiedades.

Como podemos ver, la teoría electromagnética de Maxwell es una gran síntesis de conocimientos científicos que, es comparable, sin menoscabo, con la síntesis de Newton. Maxwell cambia la concepción del universo y a la vez, su teoría se establece como un paradigma según lo concibe Khun¹⁰³, pero también, es el catalizador de nuevas corrientes de pensamiento (Lorentz, Abraham, Einstein).

Valorando la teoría electromagnética de Maxwell, a la luz de sus resultados prácticos, podemos decir que fue un éxito total y que, cualquier otra concepción que pudiera surgir, nos acercará más al conocimiento del universo, pero no hará desmerecer en nada los esfuerzos de James Clerk Maxwell.

¹⁰³ Khun, T. (1971). *Obra Citada*

c). Las ecuaciones de Maxwell en la actualidad.

En la actualidad contamos con una enorme evidencia experimental acumulada en los siglos XIX y XX, que nos permite aseverar que las ecuaciones de Maxwell gobiernan los fenómenos electromagnéticos, cuando estos son observados desde el punto de vista macroscópico. Según hemos visto, la determinación de Coulomb de la ley de fuerzas entre cargas eléctricas¹⁰⁴, las investigaciones de Ampère sobre la interacción entre elementos de corriente¹⁰⁵ y las observaciones de Faraday¹⁰⁶ sobre los campos variables, pueden ser considerados como los argumentos plausibles que soportan esta afirmación.

En consecuencia, en este escrito se postulan como válidas las ecuaciones de Maxwell y se procederá a establecerlas, para deducir las propiedades de los campos, junto con las relaciones entre los campos y las fuentes que los producen.

En este contexto, las ecuaciones de Maxwell son la columna vertebral de la teoría electromagnética y ningún experimento simple podrá constituirse como prueba de esta teoría. La prueba de validez, será establecida mediante la correspondencia uniforme y persistente de las deducciones teóricas, con la observación.

Los vectores de campo

Vamos a entender como *campo electromagnético*, el dominio de los cuatro vectores \vec{E} , \vec{D} , \vec{B} y \vec{H} . Estos vectores se supondrán finitos en todo el dominio de definición y serán funciones continuas de la posición y del tiempo, en todo punto ordinario¹⁰⁷ del campo y tendrán derivadas de orden n , también continuas, en todo punto ordinario del campo.

En superficies que presenten un cambio abrupto de las propiedades del medio, podrán haber discontinuidades, pero este caso se tratará mediante condiciones a la frontera.

Como tradicionalmente ocurre, \vec{E} y \vec{H} representarán las intensidades de los campos eléctrico y magnético, respectivamente. \vec{D} representará el desplazamiento eléctrico y \vec{B} la inducción magnética. Eventualmente, el campo electromagnético será definido en términos de las evidencias experimentales mediante las cuales los vectores \vec{E} , \vec{D} , \vec{B} y \vec{H} pueden ser medidos. En tanto que esos experimentos sean formulados, no existe razón alguna para considerar un vector más fundamental que otro y la palabra intensidad, significará "magnitud" de cualquiera de los cuatro vectores en cualquier punto arbitrario y en cualquier tiempo.

Consideraremos como fuente del campo electromagnético a una distribución de cargas eléctricas y corrientes. En virtud de que nuestro tratamiento es desde el punto de vista macroscópico, supondremos que la distribución es continua (como oposición a discreta) y especificaremos una

¹⁰⁴ Shamos, M. (1959). Obra Citada

¹⁰⁵ Berkson, W. (1985). Obra citada

¹⁰⁶ Faraday, M. (1965). Obra citada

¹⁰⁷ En este contexto, punto ordinario significa, cualquier punto del campo en cuya vecindad, las propiedades del medio son continuas

función del espacio y del tiempo mediante la densidad de carga ρ y por el vector densidad de corriente \vec{J} .

Ahora postulamos que cada punto ordinario del espacio vectorial electromagnético, está sujeto a las ecuaciones¹⁰⁸ de Maxwell:

$$1) \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{E} + \partial \vec{B} / \partial t = 0$$

$$2) \quad \vec{\nabla} \times \vec{H} - \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \vec{J}$$

Como ya establecimos, la transición de los vectores de campo y sus derivadas, al cruzar una superficie que contenga a un medio material, pueden ser discontinuas; tales superficies serán excluidas de nuestro análisis, hasta que la naturaleza de las discontinuidades sea investigada.

Carga y Corriente eléctrica

Aun cuando la naturaleza corpuscular de la electricidad está bien establecida, el tamaño del cuanto de carga es demasiado pequeño para poder considerarlo como un elemento distinguible, en un enfoque estrictamente macroscópico. Desde luego, la frontera que separa lo microscópico de lo macroscópico es arbitraria; para fijar nuestra posición, consideraremos como el menor elemento de longitud aceptable, para el enfoque macroscópico, aquel que tenga una décima de milímetro. Esta longitud permitirá un volumen tal, que contendrá una enorme cantidad de átomos. Existen experimentos tales como la dispersión de la luz por partículas no mayores a 10^{-3} mm de diámetro, lo cual indica que la teoría macroscópica pudiera desarrollarse bien, más allá de los límites que hemos impuesto, sin embargo, en ese caso, estaríamos ocupando el espacio propio de la mecánica cuántica, lo que no deseamos, puesto que la propia teoría cuántica dará validez a nuestras hipótesis, en el dominio de lo microscópico.

Supongamos una carga Δq contenida en un volumen ΔV , la densidad de carga en cualquier punto interior de ΔV será definida por la relación

$$3) \quad \Delta q = \rho \Delta V$$

De esta manera, nosotros entendemos como densidad de carga en un punto, a la cantidad de carga por cada unidad de volumen en la vecindad de dicho punto. Nótese que, en sentido estricto, la ecuación 3), no define a una función continua de la posición ya que ΔV no puede aproximarse a cero indefinidamente, puesto que hemos definido una longitud mínima aceptable, en nuestro análisis. Sin embargo, haremos la hipótesis de que ρ es una función continua de las coordenadas y del tiempo, definida en cada punto, con derivadas continuas. El valor de la carga obtenido al integrar tal función sobre un volumen finito, diferirá de la carga real contenida, por una cantidad despreciablemente pequeña.

¹⁰⁸ En el desarrollo de esta sección, se usará al operador $\vec{\nabla}$ (nabla) conforme a su uso común en matemática, para representar al gradiente $\vec{\nabla}\phi$, divergencia $\vec{\nabla} \cdot \vec{F}$ o rotacional $\vec{\nabla} \times \vec{N}$, de funciones escalares o vectoriales, según sea el caso.

Una corriente eléctrica está definida por cualquier movimiento ordenado de cargas. Una distribución de corrientes está caracterizada por un vector de campo que especifica tanto la intensidad del flujo como su dirección. Análogamente a lo establecido para el movimiento de fluidos, es conveniente imaginar líneas de corriente, trazadas a través de la distribución (como lo concibió Faraday), tangentes en todo punto a la dirección del flujo. Si consideramos una superficie ortogonal al sistema de líneas de corriente, la densidad de corriente en cualquier punto de esta superficie, se define como el vector \vec{J} , que tiene la dirección de las líneas de corriente, en el punto considerado y es igual en magnitud, a la carga que, en la unidad de tiempo y por cada unidad de área, cruza en la vecindad del punto.

La corriente eléctrica I a través de cualquier superficie S es igual a la rapidez a la cual la carga eléctrica cruza dicha superficie.

Si \hat{n} es un vector unitario, normal a un elemento Δa de S , tenemos:

$$4) \quad \Delta I = \vec{J} \cdot \hat{n} \Delta a$$

Nuevamente, debemos notar que Δa es un elemento de área pequeño, pero macroscópico y por tanto, nuestra ecuación 4) no representa a la densidad de corriente, con rigor matemático, como una función continua de la posición, pero, integrando, podemos representar a la distribución, sin error apreciable, como en la ecuación:

$$5) \quad I = \int_S \vec{J} \cdot \hat{n} da$$

Para la ecuación anterior, haremos la siguiente convención:

Si el flujo de carga a través del elemento de superficie está formado por cargas positivas, cuyo vector de velocidad forma un ángulo menor a 90° con el vector unitario normal \hat{n} , es positiva y si el ángulo es mayor a 90° , será negativa. En el caso de que las cargas sean negativas, ocurrirá lo contrario.

En la misma ecuación 5), cabe aclarar que, consideramos que el vector unitario normal \hat{n} , será positivo siempre que "salga" de la superficie (que consideramos cerrada), de esta manera, la integral sobre la superficie S de la componente normal de \vec{J} , mide la pérdida de carga de la región contenida en la superficie S .

Dado que no existe evidencia experimental que indique que, bajo condiciones normales, alguna cantidad macroscópica de carga pueda ser creada o destruida, podemos establecer:

$$6) \quad \int_S \vec{J} \cdot \hat{n} da = - \frac{d}{dt} \int_V \rho dV$$

En la ecuación 6), V es el volumen encerrado por S y dicha ecuación, representa el principio de conservación de la carga.

El flujo de carga a través de la superficie S, puede ocurrir de las dos siguientes maneras:

- a) La superficie S puede permanecer fija en el espacio y la densidad ρ puede ser una función del tiempo y de la posición.
- b) La densidad de carga ρ puede ser constante en el tiempo, en tanto que la superficie S se mueve de alguna manera.

En el caso b), la integral derecha de la ecuación 6) es una función del tiempo.

Sin embargo, si la superficie S es fija y la integral es convergente, podemos reemplazar a la derivada total $\frac{d}{dt}$ por una derivada parcial $\frac{\partial}{\partial t}$ bajo el signo de integración, modificando la ecuación 6) a quedar:

$$7) \quad \int_V \vec{J} \cdot \hat{n} da = - \int_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV$$

Usando el teorema de la divergencia¹⁰⁹, la integral del miembro izquierdo de 7) puede ser escrito:

$$8) \quad \int_S \vec{J} \cdot \hat{n} da = \int_V \nabla \cdot \vec{J} dV$$

Sustituyendo 8) en 7), obtenemos

$$9) \quad \int_V \left(\nabla \cdot \vec{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} \right) dV = 0$$

Como la integral 9) se anula, para un volumen arbitrario V, entonces el integrando deberá ser cero idénticamente, llevándonos a la ecuación:

$$10) \quad \nabla \cdot \vec{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$$

La ecuación 10) expresa la conservación de la carga en un punto y por analogía con la dinámica de fluidos, es conocida también, como la ecuación de continuidad.

Si en todo punto de una región dada, la densidad de carga es constante, la corriente que pasa *hacia* la región encerrada por una superficie, deberá en todo momento, ser igual a la carga que *sale* de la superficie. Entonces, sobre la superficie S, que encierra a la región, tenemos:

$$11) \quad \int_S \vec{J} \cdot \hat{n} da = 0$$

¹⁰⁹ El teorema puede revisarse en: Morse, P. And Feshbach, H. Pg.34-39, *Methods of Theoretical Physics*. MacGraw Hill. New York. 1953.

Y en todo punto interior:

$$12) \quad \nabla \cdot \vec{J} = 0$$

A cualquier movimiento caracterizado por un vector (o una cantidad escalar) que sea independiente del tiempo, se le conoce como *estacionario*.

Entonces, un flujo eléctrico del estado estacionario, queda definido por un vector \vec{J} , el cual es en todo punto de una región dada, constante tanto en magnitud como en dirección.

Dado que la divergencia de una distribución en estado estacionario es nula, podemos aseverar que en el estado estacionario, todas las líneas de flujo o filamentos de corriente, se cierran sobre si mismas y por tanto:

El campo del vector \vec{J} , es *solenoidal*.

$$\text{Dado que, } \nabla \cdot (\nabla \times \vec{A}) = 0 \quad \nabla \cdot \vec{A}^{110}$$

Si aplicamos el operador divergencia a la ecuación 1), obtenemos:

$$13) \quad \nabla \cdot \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \cdot \vec{B}) = 0$$

En la ecuación anterior, hemos intercambiado los operadores ∇ y $\frac{\partial}{\partial t}$ ya que \vec{B} es continuo para cualquier punto ordinario y sus derivadas, son continuas también.

Entonces, la ecuación 13) no es otra cosa, que afirmar que la divergencia de \vec{B} es constante en todo punto del campo. Si alguna vez, en el pasado, el campo se ha anulado, la constante deberá ser cero y entonces, podemos, razonablemente suponer que la generación inicial del campo ocurrió en un tiempo no infinitamente remoto y concluimos que:

$$14) \quad \nabla \cdot \vec{B} = 0$$

La ecuación anterior, establece que el campo del vector \vec{B} es *solenoidal*.

Procediendo de manera análoga a como lo hicimos con la ecuación 1), vamos a trabajar la ecuación 2)

La divergencia de 2), nos lleva a:

¹¹⁰ Reitz, J. and Mildford, F. *Foundations of Electromagnetic Theory*. Addison Wesley Series in Physics. U.S.A. 1960. Pp. 18.

$$15) \quad \nabla \cdot \vec{J} + \frac{\partial(\nabla \cdot \vec{D})}{\partial t} = 0$$

Usando la ecuación 10) obtenemos:

$$16) \quad \frac{\partial}{\partial t}(\nabla \cdot \vec{D} - \rho) = 0$$

Aceptando, nuevamente, que alguna vez en el pasado el campo se anuló, se cumple que:

$$17) \quad \nabla \cdot \vec{D} = \rho$$

La última ecuación nos dice que, las cargas distribuidas con densidad ρ constituyen la fuente del vector \vec{D} .

Las ecuaciones 14) y 17), son frecuentemente incluidas como el sistema de las ecuaciones de Maxwell, junto con las ecuaciones 1) y 2). Sin embargo, si postulamos el principio de conservación de la carga, estas relaciones no son independientes.

A manera de resumen, las ecuaciones 1), 2), 14) y 17) constituyen el conjunto de ecuaciones matemáticas que resumen a la teoría electromagnética de Maxwell y que por su notación, reciben el nombre de ecuaciones de Maxwell en forma diferencial, se incluyen en el siguiente cuadro:

Cuadro 4.2

I)	$\nabla \times \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0$
II)	$\nabla \times \vec{H} - \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \vec{J}$
III)	$\nabla \cdot \vec{B} = 0$
IV)	$\nabla \cdot \vec{D} = \rho$

Estas ecuaciones pueden ser expresadas, equivalentemente, en forma integral, para lo cual, será necesario utilizar dos teoremas relacionados con el cálculo vectorial, que a continuación se enuncian, sin demostración¹¹¹:

1.- Teorema de Stokes que establece que la integral de línea de un vector, calculada a lo largo de una curva cerrada C, puede ser transformada en una integral de superficie, del rotacional de dicho vector, calculada sobre cualquier superficie S acotada por la curva C, siempre y cuando, el contorno C sea regular o pueda ser expresado como un conjunto finito de arcos regulares, lo cual es

¹¹¹ Una demostración formal de estos teoremas, puede ser revisada en Morse, P. And Feshbach, H. *Methods of Theoretical Physics*. MacGraw Hill. New York. 1953.

equivalente a exigir que la superficie S acotada por el contorno C, sea una superficie de dos lados y pueda ser expresada mediante un conjunto finito de elementos de superficie regulares.

Entonces si, $\vec{A}(x, y, z)$ es una función vectorial de punto, continua, con derivadas continuas en S y C, se cumple que:

$$18) \quad \int_C \vec{A} \cdot d\vec{l} = \int_S (\nabla \times \vec{A}) \cdot \hat{n} da$$

Donde, $d\vec{l}$ es un elemento de longitud a lo largo de C y \hat{n} es un vector unitario normal al lado positivo del elemento diferencial de superficie da .

2.- Teorema de la Divergencia que establece que la integral de superficie de la componente normal de un vector \vec{A} tomada sobre una superficie cerrada S, es igual a la integral de la divergencia de \vec{A} calculada en el volumen V, encerrado por dicha superficie.

Entonces, dada una función vectorial de punto $\vec{A}(x, y, z)$ continua, con primeras derivadas continuas en un volumen V y sobre una superficie regular S, que acota al volumen V, se cumple que:

$$19) \quad \int_S \vec{A} \cdot \hat{n} da = \int_V (\nabla \cdot \vec{A}) dv$$

En la ecuación I, integrando la componente normal del vector $\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ sobre cualquier superficie regular S acotada por el contorno cerrado C, tenemos:

$$20) \quad \int_C \vec{E} \cdot d\vec{l} + \int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot \hat{n} da = 0$$

Si el contorno C es fijo, el operador $\frac{\partial}{\partial t}$ puede ser puesto fuera de la integral, llevándonos a:

$$21) \quad \int_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{\partial}{\partial t} \int_S \vec{B} \cdot \hat{n} da$$

Tenemos definida a la cantidad $\int_S \vec{B} \cdot \hat{n} da$ como el flujo de campo magnético ϕ_B (el flujo del vector \vec{B} a través de la superficie S), entonces:

$$22) \quad \phi_B = \int_S \vec{B} \cdot \hat{n} da$$

Que sustituido en la ecuación 21) nos lleva a:

$$23) \quad \int_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{\partial \phi_B}{\partial t}$$

Hemos aplicado el teorema de Stokes a la ecuación I, el cual tiene validez sólo si, como establecimos, el vector \vec{E} y sus derivadas son continuos en todo punto de S y de C. Dado que los vectores \vec{E} y \vec{B} en general, presentarán discontinuidades cuando estén referidos a sistemas físicos reales, podremos hacer la suposición, válida, de que las propiedades físicas de nuestro sistema, pueden variar rápidamente pero de forma continua, de esta manera, aseguramos la validez de la ecuación 21).

Los experimentos de Faraday indican que la relación 21) se cumple, independientemente de la causa que origine la variación del flujo de campo magnético, lo que nos permite considerar que puede variar en un contorno fijo o en un contorno variable, por ello, podemos escribir finalmente a la ecuación 21) en la forma:

$$24) \quad \int_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot \hat{n} da$$

De manera análoga, la ecuación II) puede ser reemplazada por una relación integral.

Integrando en la ecuación II) la componente normal de $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ con respecto a una superficie cerrada S arbitraria:

$$25) \quad \int_S (\vec{\nabla} H - \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}) \cdot \hat{n} da = \int_S \vec{J} \cdot \hat{n} da$$

$$26) \quad \int_C \vec{H} \cdot d\vec{l} - \int_S \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \cdot \hat{n} da = \int_S \vec{J} \cdot \hat{n} da$$

La integral del lado derecho de 26) es el término que hemos definido como la corriente de conducción I, entonces:

$$27) \quad \int_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = I + \int_S \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \cdot \hat{n} da$$

Nuevamente, el integrando del lado derecho, está considerando la variación de \vec{D} en un contorno fijo, pero dicha variación puede ocurrir, también por cambios en el contorno y para tomar esto en cuenta, escribimos:

$$28) \quad \oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = I + \frac{d}{dt} \int_S \vec{D} \cdot \hat{n} da$$

En el estado estacionario, la integral del lado derecho de 28) es cero y entonces, la corriente de conducción I , a través de cualquier superficie regular es igual a la integral de línea del vector \vec{H} alrededor de este contorno. Cuando el campo es variable, el vector $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ está asociado con el campo \vec{H} de manera exactamente igual a la que se comportaría una distribución de densidad de corriente.

$$29) \quad \vec{j} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

A esta cantidad, fue a la que Maxwell denominó "*corriente de desplazamiento*".

La ecuación III), al aplicarle el teorema de la divergencia, se convierte en:

$$30) \quad \oint_S \vec{B} \cdot \hat{n} da = 0$$

La ecuación 30) establece que el flujo total del vector \vec{B} a través de cualquier superficie regular cerrada S , es cero.

Finalmente, aplicando el teorema de la divergencia a la ecuación IV), obtenemos:

$$31) \quad \oint_S \vec{D} \cdot \hat{n} da = \int_V \rho dv = q$$

La ecuación 31) establece que el flujo del vector \vec{D} a través de una superficie cerrada, arbitraria, es igual a la carga eléctrica total contenida dentro de dicha superficie.

Hemos entonces establecido las cuatro ecuaciones de Maxwell, en forma integral, mediante las ecuaciones 24, 28, 30 y 31. Nuevamente las incluimos en un cuadro.

Cuadro 4.3

I')	$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_S \vec{B} \cdot \hat{n} da$
II')	$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = I + \frac{d}{dt} \int_S \vec{D} \cdot \hat{n} da$
III')	$\oint_S \vec{B} \cdot \hat{n} da = 0$
IV')	$\oint_S \vec{D} \cdot \hat{n} da = \int_V \rho dv = q$

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

En la página 43 de esta tesis, incluimos las ecuaciones de Maxwell, según las publicó, explicando en detalle su origen. Para demostrar su equivalencia con las que, en notación moderna hemos incluido en los cuadros 4.2 y 4.3, procederemos, para mayor claridad, a escribirlas nuevamente:

Cuadro 4.1

A. Ecuación de la corriente total	$\vec{T} = \vec{J} + \frac{d\vec{D}}{dt}$
B. Ecuación de la fuerza magnética	$\mu\vec{H} = \nabla \times \vec{A}$
C. Ecuación de la corriente eléctrica	$4\pi\vec{T} = \nabla \times \vec{H}$
D. Ecuación de la fuerza electromotriz	$\vec{E} = \vec{v} \times \mu\vec{H} - \frac{d\vec{A}}{dt} - \nabla\psi$
E. Ecuación de la elasticidad eléctrica	$\vec{E} = \kappa\vec{D}$
F. Ecuación de la resistencia eléctrica	$\vec{E} = -r\vec{J}$
G. Ecuación de la electricidad libre	$\rho + \nabla \cdot \vec{D} = 0$
H. Ecuación de continuidad	$\frac{d\rho}{dt} + \nabla \cdot \vec{J} = 0$

En las ecuaciones A a la H, se distinguen dos tipos de variables que son:

vectoriales

\vec{T} = corriente total
 \vec{J} = corriente de conducción
 \vec{D} = desplazamiento eléctrico
 \vec{H} = fuerza magnética
 \vec{A} = vector potencial (estado electrotónico)
 \vec{E} = fuerza electromotriz
 \vec{v} = velocidad del conductor.

Escalares

μ = permeabilidad magnética
 ψ = potencial electrostático
 κ = recíproco de la constante dieléctrica
 ρ = densidad volumétrica de carga
 r = resistencia del conductor.

Evidentemente las ecuaciones encerradas en los cuadros 4.2 y 4.3 son equivalentes, sólo hemos expresado de dos maneras diferentes, la misma información, sin embargo, estas ecuaciones escritas en lenguaje moderno (vectorial), difieren de las ecuaciones que escribió Maxwell en sus trabajos y que hemos resumido en el cuadro 4.1

Con el objetivo único de evidenciar la concordancia entre las ecuaciones contenidas en los cuadros 4.1 y 4.3, pero haciendo caso omiso de constantes, que en general provienen del sistema de unidades que se emplee, hagamos lo siguiente:

La ecuación B) del cuadro 4.1, establece la equivalencia entre el campo magnético y el rotacional del vector potencial:

$$B) \quad \mu \vec{H} = \vec{\nabla} X \vec{A}$$

Además, Maxwell estableció la equivalencia entre el campo eléctrico y la variación en el tiempo del vector potencial (estado electrostático).

$$32) \quad \vec{E} = \frac{d\vec{A}}{dt}$$

Calculando el rotacional a 32), obtenemos:

$$33) \quad \vec{\nabla} X \vec{E} = \vec{\nabla} X \frac{d\vec{A}}{dt}$$

Intercambiando los operadores $\vec{\nabla}$ y $\frac{d}{dt}$, obtenemos:

$$34) \quad \vec{\nabla} X \vec{E} = \frac{d}{dt} (\vec{\nabla} X \vec{A})$$

Sustituyendo B) en 32):

$$33) \quad \vec{\nabla} X \vec{E} = \frac{d}{dt} (\mu \vec{H})$$

Por lo que:

$$34) \quad \vec{\nabla} X \vec{E} - \frac{d(\mu \vec{H})}{dt} = 0$$

Y como

$$35) \quad \mu \vec{H} = \vec{B}$$

La ecuación 34) y la ecuación I son la misma.

Tomando las ecuaciones A) y C) del cuadro 4.1

$$36) \quad \vec{\nabla} X \vec{H} = 4\pi \left(\vec{J} + \frac{d\vec{D}}{dt} \right)$$

$$37) \quad \vec{\nabla} X \vec{H} - 4\pi \frac{d\vec{D}}{dt} = 4\pi \vec{J}$$

La ecuación 37), excepto por constantes, es igual a la ecuación II del cuadro 4.2

Tomando nuevamente la ecuación B) del cuadro 4.1 y calculando la divergencia tenemos:

$$38) \quad \nabla \cdot (\mu \vec{H}) = \nabla \cdot (\nabla \times \vec{A})$$

Con lo que

$$39) \quad \nabla \cdot \mu \vec{H} = 0$$

Las ecuaciones 39) y III del cuadro 4.2, son la misma.

Finalmente, la ecuación G) que aparece en el cuadro 4.1, es precisamente la ecuación IV) del cuadro 4.2, con lo que hemos mostrado la equivalencia entre las ecuaciones.

Capítulo 4.- Propuesta de Enseñanza

Introducción.- En los capítulos anteriores se ha explicado el propósito de este trabajo, se ha dado respuesta al qué queremos hacer y también se han planteado los motivos por los cuales se hace esta propuesta. El presente capítulo es dedicado a hacer una descripción detallada del desarrollo de la propuesta de enseñanza, que se refiere a la teoría electromagnética de Maxwell y está basada en el constructivismo, en la cual, es pertinente aclarar que la planeación de las actividades descansa de manera importante en las preconcepciones de quien esto escribe, dichas preconcepciones son originadas por el propio ejercicio docente, que se remonta a más de dos décadas; pero también se justifican las acciones llevadas a cabo, tomando en consideración los trabajos de investigación realizados por los estudiosos del tema así como sustentadas por los datos objetivos publicados por las Facultades de Ciencias, Química e Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México.

En la primera parte de este capítulo, se muestran los resultados que se han obtenido históricamente en las Facultades de Ciencias y Química, en las asignaturas relativas al electromagnetismo, que como se ha dicho, es el tema al que se refiere esta tesis. Los índices de reprobación consignados por las dependencias universitarias que se mencionan, evidencian que no pueden ser considerados como satisfactorios. El electromagnetismo se imparte en los primeros semestres de las carreras de ciencias e ingeniería y por ende, está ligado fuertemente a los resultados que los estudiantes obtienen precisamente en esos primeros semestres. Las facultades de Ingeniería y Química, tienen establecidos programas especiales cuya simple existencia evidencia la insatisfacción por los resultados que se obtienen en los primeros semestres o bien, por la preparación deficiente con que ingresan los estudiantes al ciclo de licenciatura y es por ello que se busca hacer más eficiente el proceso de enseñanza y aprendizaje a partir de los semestres iniciales de las carreras. En este trabajo se hace una descripción breve de dichos programas y los resultados obtenidos.

A continuación se explica el porque la propuesta se hace con el referente teórico del constructivismo, se ubican los posibles orígenes de las preconcepciones de los estudiantes y se propone una secuencia temática para el curso. La manera en que esta propuesta de enseñanza sugiere abordar los temas del curso, se justifica a través de las siguientes consideraciones: El contenido del programa oficial vigente de la asignatura, las características socioeconómicas de los estudiantes, los resultados de los exámenes diagnóstico aplicados, la percepción sobre la motivación intrínseca de los estudiantes y mi experiencia al respecto.

Una actividad muy importante, desarrollada durante la ejecución de esta propuesta, está constituida por las entrevistas, que individual o colectivamente tuve con los estudiantes, en dichas entrevistas se podía apreciar con claridad en qué aspectos se iban logrando los aprendizajes deseados y se evidenciaba también cuales eran los aspectos que dificultaban el avance en la construcción del conocimiento de los estudiantes; los análisis de las respuestas de los estudiantes durante las entrevistas, constituyeron el indicador principal de las acciones que habrían de tomarse para lograr los objetivos planteados en el programa de la asignatura. De dichas entrevistas, se incluyen seis, que se consideraron representativas pues se refieren a tres estudiantes seleccionados de cada uno de los tres subgrupos en que fue subdividido, para efectos del análisis, el grupo de alumnos con el que se ensayó esta propuesta. En estas seis entrevistas seleccionadas puede observarse con facilidad, la evolución de los estudiantes en función del proceso de enseñanza aprendizaje.

No menos importante resulta a esta propuesta, la revisión histórica llevada a efecto en lo referente al establecimiento de la teoría electromagnética de Maxwell pues con muy alta frecuencia, nos referimos a las situaciones problemáticas de los científicos que hicieron aportaciones a la teoría, a sus concepciones filosóficas, a su entorno social, político y científico. El conocer estos aspectos resultó en todos los casos, como el catalizador que activaba la motivación intrínseca del alumno pues el identificar sus propias concepciones con las que se tuvieron en otras épocas los generadores de la teoría motivo de estudio, les resultó en general, gratificante y los guiaba, a través de las soluciones encontradas, a lograr una mejor construcción de su conocimiento.

En la parte final de este capítulo, se incluyen las relatorías específicas de la manera en que fueron tratados algunos temas, cuales fueron las dificultades encontradas, que acciones se tomaron para resolver dichas dificultades y que resultados se obtuvieron, ejemplos de estos temas son, la ley de interacción entre partículas cargadas así como la construcción del concepto campo eléctrico.

Se incluyen en este capítulo los resultados obtenidos por la ejecución de la propuesta de enseñanza tanto en el aspecto cuantitativo (particularmente el normativo) como las percepciones del cambio cualitativo que mostraron los estudiantes.

Antecedentes

En la actualidad (y por lo general), el primer tratamiento serio de la teoría electromagnética se estudia, después de que el alumno ha cursado una o varias asignaturas de física introductoria sobre electricidad y magnetismo y con respecto al conocimiento de las matemáticas, los currícula indican que los estudiantes poseen conocimientos sobre cálculo diferencial e integral de función de una variable, álgebra y geometría analítica. Es recomendable que el alumno, antes de inscribirse a las asignaturas que se refieren al electromagnetismo, tenga un conocimiento matemático que le permita la utilización del cálculo diferencial integral de funciones de varias variables, análisis vectorial y ecuaciones diferenciales ordinarias, puesto que, como ha quedado demostrado en el capítulo anterior, son las herramientas indispensables, en la actualidad, para abordar, entender y aplicar la teoría electromagnética.

En los cursos que con anterioridad he impartido, sobre electricidad y magnetismo, en una aproximación clásica, basada en la ley de Coulomb de interacción entre cargas y la ley de Biot-Savart, para explicar la interacción entre elementos de corriente, necesariamente, se hace énfasis, en la independencia de los campos eléctrico y magnético, lo que ocasiona que más tarde, al alumno, se le dificulte relacionarlos significativamente. Esta presentación se hace, sugerida tanto por los diferentes programas de estudios como por el orden en que los temas son presentados en los libros de texto usados comúnmente y, desde el punto de vista didáctico, porque facilita al estudiante resolver algunos problemas teóricos o prácticos simplificados, pero he constatado en mis cursos, que esta presentación conlleva una pérdida de claridad conceptual que se manifiesta cuando se tratan, entre otros, los conceptos "impedancia", "voltaje inducido", "inductancia", este es uno de los factores que, en mi opinión, originan que en los cursos introductorios sobre teoría electromagnética a nivel licenciatura, los resultados que se obtienen en la actualidad no sean satisfactorios. Esta presentación de los temas del curso, entre otros factores, provoca que los índices de aprobación en las asignaturas correspondientes sean bajos y la comprensión de los conceptos sea confusa. Como un ejemplo de los resultados cuantitativos que se han obtenido en los cursos sobre electromagnetismo, a continuación se muestran los informados por las Facultades de Ciencias y Química de la Universidad Nacional Autónoma de México, correspondientes a los semestres 98/1, 98/2 y 99/1.

Semestre	Facultad de Ciencias	
	Total Inscritos	No Aprobados.
	Electromagnetismo	
98-I	60	36
98-II	106	52
99-I	59	29
Totales	225	117
	Electrodinámica	
98-I	58	25
98-II	23	15
99-I	80	34
Totales	161	74
	Facultad de Química	
	Electromagnetismo	
98-I	565	219
98-II	575	276
99-I	517	216
Totales	1657	711

TABLA 5.1 RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS FACULTADES DE CIENCIAS Y QUÍMICA DE LA UNAM. PARA LAS ASIGNATURAS SOBRE ELECTROMAGNETISMO, EN LOS SEMESTRES 98/1, 98/2 Y 99/1.

Una opinión generalizada entre los estudiantes, es que el grado de dificultad de las asignaturas relacionadas con la teoría electromagnética, es alto ya que la comprensión (construcción) de la teoría es difícil y los resultados que se muestran en la tabla 5.1, lo corroboran.

No es necesario realizar un estudio más para demostrar que los malos resultados obtenidos hasta el momento, entre otros muchos factores, obedecen también a que se ha pretendido formar el *espíritu científico* mediante métodos de enseñanza repetitivos e impositivos, en donde se les obliga a creer en las teorías de la misma forma en que se les enseñó religión o el reglamento de los niños exploradores en su infancia.

Quienes pretendemos enseñar ciencia (facilitar que el estudiante construya su conocimiento científico), debemos tener claro que la ciencia es, fundamentalmente, la unión de una actitud crítica, reflexiva, abierta a la comunicación, con disposición hacia la interrelación, que incide de manera directa e importante en la sociedad, en la cultura, en el dominio del medio y por tanto en la calidad de vida.

En esta tesis se considera que el elemento fundamental del proceso educativo en el que se enmarca la enseñanza de la ciencia, es la relación entre el aprendiz y la disciplina científica, que dicha relación debe darse, propiciando que el estudiante logre apropiarse de las herramientas intelectuales que le permitan modificar, cuando sea necesario, su ejercicio profesional y modificarse a sí mismo, en función de la evolución tanto científico-tecnológica como sociocultural.

Un propósito secundario de este trabajo consiste en atraer la atención de los encargados de las reformas educativas (que en la UNAM se dan con el nombre de "modificaciones a los planes y programas de estudios"), las cuales, hasta el momento y por lo general, sólo se reducen a cambios en el

enfoque de las disciplinas, se ocupan de desplazar las asignaturas contenidas en un plan de estudios ya sea horizontal o verticalmente y en muchos casos, sólo se transfieren contenidos de una asignatura a otra, cuando lo que verdaderamente se hace indispensable, es lograr un cambio de actitud de los actores directamente involucrados en el proceso educativo. Es deseable que los docentes sean capacitados y/o actualizados mediante cursos, talleres y seminarios que se refieran, tanto al área específica de su conocimiento como a los aspectos epistemológicos de la ciencia en lo general y de su disciplina en lo particular, para que los profesores puedan generar las condiciones favorables para que el estudiante construya el conocimiento científico. Es condición indispensable, que los profesores posean los conocimientos y habilidades necesarias para establecer las relaciones entre el estudiante y la disciplina, haciéndoles llegar los instrumentos idóneos para que el alumno se apropie del saber.

Por otro lado, una fracción considerable de los estudiantes que ingresan a las carreras científicas que se imparten en la UNAM, poseen una preparación previa sumamente defectuosa, tienen un lenguaje limitado, les es difícil comprender lo que leen, no tienen destreza para realizar las operaciones aritméticas fundamentales, carecen de buenos hábitos de estudio y, estos factores, entre otros muchos, hacen realmente difícil que se dé un proceso de enseñanza y aprendizaje exitoso puesto que el conocimiento científico que queremos que el estudiante construya posee, entre otros atributos:

- a) Alto nivel de abstracción
- b) Estructuración de los conceptos en forma de teoría y
- c) Contenidos contrarios a la intuición y experiencia cotidianas.

Un dato reciente, que puede corroborar lo que aquí se dice, es el siguiente: México ocupó el penúltimo lugar entre los 40 miembros de la OCDE, en la prueba de lectura de comprensión que dicho organismo realizó entre sus miembros asociados, el Subsecretario de Educación Básica y Normal de la Secretaría de Educación Pública de México, mencionó que jóvenes de 15 años carecen de las capacidades básicas para comprender lo que leen y declaró "...tenemos niños que no cuentan con los elementos más fundamentales. Esto no es para alarmarnos¹¹²...". La declaración del Subsecretario se refiere a los estudiantes de 15 años, lo que significa que están en el periodo en que van a iniciar sus estudios de bachillerato y, para que dichos estudiantes ingresen al nivel universitario, se deberá realizar un esfuerzo verdaderamente notable para que, en tres años, el estudiante logre la preparación necesaria para iniciar exitosamente una carrera universitaria. Esta circunstancia y otras relativas, hacen necesario que se revisen cuidadosamente los criterios de selección e ingreso a las carreras universitarias o bien, que se establezcan programas adecuados y eficientes, encaminados a lograr el desarrollo del pensamiento formal en los estudiantes, en lugar de los cursos que, con los nombres de "remediales" o "propedéuticos", se han establecido en algunas dependencias de la UNAM (y en algunas universidades privadas) y que se reducen, simplemente a repetir en menor tiempo, los cursos del ciclo inmediato anterior o a impartir los cursos curriculares de los primeros semestres de la carrera, con menor profundidad que la indicada en el programa de la asignatura. Como ejemplos de estos programas se pueden citar:

a) Programa SADAPI (Programa de Atención Diferenciada a Alumnos de Primer Ingreso), establecido en la Facultad de Química de la UNAM, en el año de 1993 y del que se puede señalar:

¹¹² Declaración de Lorenzo Gómez-Morín (SubSecretario de Educación Básica y Normal S.E.P. México) Periódico la Jornada, 6 de agosto de 2002, Pg. 34. México.

Tras de haber realizado el examen diagnóstico a los estudiantes de nuevo ingreso a la Facultad de Química de la UNAM, generación 1992, se hizo el análisis estadístico correspondiente y se invitó a los estudiantes que obtuvieron los mejores resultados en dicho examen (cuarto cuartil de la distribución) a inscribirse en el programa que se denominó PAEA (Programa de Alta Eficiencia Académica) y al año siguiente, se complementó dicho programa, haciendo una invitación a los estudiantes de la generación 1993 que obtuvieron los resultados más bajos en el examen diagnóstico (primer y segundo cuartil de la distribución), a integrarse al programa SADAPI, cuya única característica conocida era que, el estudiante podía cursar en un año, las asignaturas correspondientes al primer semestre¹¹³.

La planta docente del programa PAEA, fue seleccionada del conjunto denominado como "los mejores profesores de la Facultad de Química de la UNAM" (es pertinente aclarar que no hubo una explicación razonable de los criterios que permitieron clasificar a dichos profesores) en tanto que la planta docente para el programa SADAPI, fue integrada por los profesores que simplemente, manifestaron su deseo de participar en el programa.

Desde el año de 1993, la vigencia del SADAPI ha sido constante y en 1998 ocurrieron tres hechos significativos para dicho programa:

1. Se llevó a efecto el "Primer Taller de los Profesores que habían Impartido clases en el SADAPI"¹¹⁴, del que surgieron las siguientes propuestas:

- ❖ Establecer un sistema de comunicación entre los profesores participantes.
- ❖ Establecer un "seguimiento" de los alumnos que formaron parte del programa SADAPI.
- ❖ Retroalimentar con los resultados del programa SADAPI, al sistema de Enseñanza Media Superior.

2. La denominación "Alumno SADAPI", había tomado, entre los estudiantes, un cariz peyorativo, haciendo coincidir su significado con el de "retrasado mental", motivo principal por el que se decidió cambiar el nombre a los grupos que participaban en el programa y se les denominó "Grupos Alfa", inspirados sus autores, en la novela de Huxley "Un mundo Feliz".

3. Para brindar asesoría a los estudiantes de los grupos SADAPI que la solicitaran, se estableció un grupo de 40 asesores (estudiantes que hubieran cursado al menos tres semestres de su carrera), nunca se hicieron públicos los resultados obtenidos.

En el año 2001, la Dirección de la Facultad de Química decidió que el programa se denominara SADAPI 2.0 y declaró:

".....EL SADAPI ES UN PROGRAMA POLÉMICO, EN LO PARTICULAR EN LO QUE SE REFIERE A SUS EFECTOS DE MAYOR PLAZO QUE A LA APROBACIÓN DEL PRIMER SEMESTRE. DECIDIMOS QUE ERA NECESARIO ADECUARLO BUSCANDO DARLE UNA MAYOR ROBUSTEZ, INCIDIENDO DE MANERA MÁS DIRECTA EN LA ADQUISICIÓN Y DESARROLLO DE OTRAS HABILIDADES.

EL OBJETIVO DEL PROGRAMA EN SU NUEVA VERSIÓN SADAPI2.0, ES:

¹¹³ Informe de la Dirección de la Facultad de Química de la UNAM 1996

¹¹⁴ Informe de la Dirección de la Facultad de Química 2001-2002

PROPORCIONAR A LOS ESTUDIANTES QUE INGRESAN AL PRIMER SEMESTRE DE LA FACULTAD DE QUÍMICA UNA OPORTUNIDAD DE ADQUIRIR LAS HABILIDADES ACADÉMICAS BÁSICAS QUE LES GARANTICE EL APROVECHAMIENTO DE LAS ACTIVIDADES ACADÉMICAS CURRICULARES.

EL EJE CENTRAL DE ESTAS HABILIDADES ES EL MANEJO DE LOS LENGUAJES COMUNES QUÍMICO Y MATEMÁTICO.

PARA ALCANZAR ESTE OBJETIVO EL PROGRAMA TIENE LA SIGUIENTE ESTRUCTURA:

* PARTICIPACIÓN VOLUNTARIA BASADA EN EL EXAMEN DIAGNÓSTICO.

* PRIMER SEMESTRE: CURSOS EXTRACURRICULARES DE QUÍMICA BÁSICA, MATEMÁTICAS BÁSICAS, TALLER DE DESARROLLO PERSONAL, CONFERENCIAS ESPECIALES; CURSO CURRICULAR DE CÁLCULO DE FUNCIÓN DE UNA VARIABLE.

* SEGUNDO SEMESTRE: CURSOS CURRICULARES DE QUÍMICA GENERAL, ÁLGEBRA Y CINEMÁTICA Y DINÁMICA; CURSO EXTRACURRICULAR DE TALLER DE INTEGRACIÓN (QUÍMICA FÍSICA Y MATEMÁTICAS).

ES PRONTO TODAVÍA PARA TENER RESULTADOS QUE PERMITAN VERIFICAR LA EFICACIA DEL PROGRAMA, PERO VALE LA PENA DESTACAR, POR LO PRONTO, UNA PARTICIPACIÓN Y COMPROMISO INTENSO DE LOS PROFESORES DEL PROGRAMA Y DE LOS RESPONSABLES DE SU CONDUCCIÓN EN LAS SIGUIENTES ACTIVIDADES.....“

Indudablemente, el programa SADAPI ha resultado benéfico para los estudiantes, pero, los resultados deben ser atribuidos, sin ambigüedad, al esfuerzo individual y aislado de los profesores participantes (y de los estudiantes inscritos) dado que:

1) Cinco años después de “establecido” el programa, se realizó la primera reunión formal entre los profesores pertenecientes al programa y se sugirieron las primeras acciones.

2) El objetivo del programa se hizo explícito ocho años después de haberse iniciado.

3) Es hasta ahora, en la versión SADAPI2.0, establecido en el semestre lectivo 2001-1, que se dota al programa de objetivos claros, se ofrecen cursos extracurriculares y conferencias, se modifica el orden en el que se imparten los cursos curriculares, etcétera.

b) Un segundo ejemplo lo constituye el programa “Cursos Propedéuticos en la Facultad de Ingeniería de la UNAM”, programa que es conocido entre la comunidad de la Facultad de Ingeniería como “Semestre Cero”, cuyos antecedentes explica el actual Jefe del Departamento de Mecánica de la División de Ciencias Básicas¹¹⁵:

1) El H. Consejo Técnico de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, dictaminó que: “Antes de cursar su primer semestre curricular, a partir del semestre lectivo 1994-1, aquellos alumnos que no obtengan calificaciones satisfactorias en el examen diagnóstico que se aplica a los estudiantes que han sido aceptados para ingresar a la Facultad de Ingeniería, llevarán un semestre de cursos propedéuticos”

2) Los cursos propedéuticos que se establecieron fueron: Álgebra, Cálculo, Física Experimental y Geometría Analítica. Cada uno de estos cursos con una asignación de 4.5 horas/semana de clase.

3) En promedio, el 71% del total de alumnos aceptados a la Facultad de Ingeniería de la UNAM, de las generaciones 1994 a 2000, han cursado obligatoriamente, este semestre propedéutico.

4) A partir del semestre lectivo 1999-1, los cursos se modificaron y en lugar de los antes mencionados, ahora se imparten: Álgebra, Geometría Analítica Plana, Cálculo, Geometría y

¹¹⁵ Solar, J. *Origen y algunos efectos de los cursos propedéuticos que se imparten, desde 1994, en la Facultad de Ingeniería*, UNAM. Escrito inédito.(2001)

Trigonometría y Técnicas para el Estudio. Los dos primeros mencionados, siguen impartándose a razón de 4.5 horas/semana, en tanto que los tres restantes, tienen asignadas 3.0 horas/semana de clase.

Los resultados de la aplicación del programa "Cursos Propedéuticos", pueden juzgarse como positivos puesto que, las estadísticas muestran que los estudiantes que cursaron (y aprobaron) los cursos propedéuticos, tienen un desempeño mejor que los que cursaron y no aprobaron las asignaturas del propedéutico y, más aun, según las estadísticas mostradas¹¹⁶, los estudiantes que aprueban los cursos propedéuticos, logran un mejor desempeño que los estudiantes aceptados en el PARA (Programa de Alto Rendimiento Académico), en el cual sólo son aceptados los estudiantes que obtienen las mejores notas en el examen diagnóstico y que durante los dos primeros semestres de su licenciatura, tienen un desempeño satisfactorio.

Sin embargo, en el mismo estudio que hace Solar, muestra que, la calificación promedio para el primer semestre, en las generaciones 1988 a 1991 (antes de la implantación del semestre cero), fue de 5.58 en una escala de 0 a 10, con un porcentaje de aprobación de asignaturas de primer semestre, del 38% Y para las generaciones 1994 a 1998 (Después del establecimiento del semestre cero) es de 6.09, con porcentaje de aprobación de asignaturas del 48%. Solar concluye la conveniencia de "continuar con el programa aun cuando existan alumnos que a pesar de los esfuerzos que la institución hace, no muestran espíritu de superación". También justifica la permanencia del programa en tanto "sean aceptadas en la Facultad de Ingeniería, personas con un nivel inadecuado de conocimientos antecedentes". Hasta aquí los comentarios de Solar.

El éxito del programa "Cursos Propedéuticos" de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, debería llevarnos a la reflexión. Usando la escala definida por la propia institución, para certificar los conocimientos de los estudiantes, obtener una calificación numérica menor a 6.0 significa no haber logrado satisfacer los requerimientos mínimos para "aprobar" una asignatura, luego, el programa ha servido para llevar a las generaciones 1994 a 1998 a obtener un promedio de calificaciones que escasamente cubre el mínimo indispensable de conocimientos, con eficiencia menor al 50%.

Refiriéndonos a un aspecto curricular de la problemática que estamos describiendo, es adecuado mencionar la concepción, casi generalizada, de que los contenidos científicos, particularmente los que se refieren a física y matemáticas, sirven fundamentalmente para *enseñar a pensar* a los estudiantes, siendo que, en realidad, para que el estudiante sea capaz de construir un conocimiento científico, contextualmente válido, es condición *sine qua non*, que posea una estructura cognitiva que incluya algún dominio sobre el pensamiento formal, lo que ha sido demostrado por algunos seguidores de Piaget, por ejemplo Aebli¹¹⁷, quien apunta ".....CONFORME A LOS CONCEPTOS DE PIAGET, ES IMPORTANTE INVESTIGAR CUÁLES SON LAS OPERACIONES MENTALES BÁSICAS DE UNA NOCIÓN NUEVA QUE SE VA A ADQUIRIR. SI HAY ADQUISICIÓN DE UNA NOCIÓN ES PORQUE EL ALUMNO HA LLEGADO A CONSTRUIRLA. SI SE DESARROLLAN EN PRIMER TÉRMINO LAS OPERACIONES NECESARIAS, LUEGO SE HARÁ POSIBLE LA ADQUISICIÓN DE LOS CONOCIMIENTOS.....". En la misma dirección apuntan los trabajos de Higelé¹¹⁸, quien con una serie de ejercicios que involucran lógica proposicional, lógica combinatoria y conceptos de proporcionalidad, ubica el nivel del sujeto en lo referente a las operaciones mentales, con base en los fracasos para resolver problemas para cuya solución, el sujeto carece de las operaciones mentales.

¹¹⁶ Solar, J. (2001) Obra citada.

¹¹⁷ Aebli, H. *Doce formas básicas de enseñar: Una didáctica basada en la psicología*. Madrid, Narcea, 1988.

¹¹⁸ Higelé, P. *Una experiencia de aprendizaje de las operaciones intelectuales*. Educación permanente. (vi/81, N58)

Estamos entonces, ante un problema multidimensional, en el que convergen las acciones de la institución educativa, de los docentes, de los estudiantes y de la sociedad en general.

Por lo que a esta propuesta compete, un punto de partida para modificar y mejorar nuestra docencia, puede ser el realizar una autocrítica de nuestro método de enseñanza de las ciencias.

Sin pretender generalizar, nos preocupamos porque nuestros estudiantes “aprendan a...” o “comprendan que...”, “sean capaces de...”, pero, ¿nos preocupamos por indagar si nuestras enseñanzas constituyen un saber útil?, este saber ¿le permitirá al estudiante comprender mejor su entorno?, ¿le facilita construir su conocimiento científico?, o simplemente insistimos en dicho tema porque “es un tema que está incluido en el programa de la asignatura”, aun cuando procede de un análisis epistemológico equivocado, ¿nos preocupamos por conocer si nuestra enseñanza está dirigida a quien puede o no apropiarse de los contenidos?, ¿conservamos el valor formativo de los conceptos y métodos científicos ubicándolos en las condiciones sociales y científicas en que fueron formulados, citando los problemas a los que pretendieron dar solución? o simplemente, en un afán de “cubrir el programa”, los descontextualizamos, privando al estudiante de la posibilidad de equilibrar su estructura cognitiva, de conformidad con lo que al respecto establece Piaget¹¹⁹ cuando afirma que “*el conocer es una función adaptativa en el sentido de que a una forma de conocimiento sólo se le puede exigir que funcione*” y cuando esto no ocurre, se produce un desequilibrio, provocando una acomodación del conocimiento previo. Este proceso de acomodación conlleva un reflexión interna que conduce a un nuevo equilibrio y por tanto, a una forma de conocimiento superior.

Por otro lado, en México, estamos sintiendo la presión que naturalmente conlleva la integración económica (y necesariamente sociocultural) originada por los acuerdos comerciales concertados tanto con América del Norte como con la Unión Económica Europea. Con todas las deformaciones inherentes, estamos tratando de homologar nuestras carreras con las de nuestros socios comerciales; Se han realizado “auditorías”, se inician procesos de validación, se pretenden otros de certificación, etcétera, Ruiz¹²⁰ hace un recorrido amplio y detallado del proceso de implantación de estas políticas desde el año de 1988, en que asume la presidencia de los Estados Unidos Mexicanos, Carlos Salinas de Gortari. Díaz Barriga¹²¹ denuncia “...la implantación autoritaria y unilateral de un proceso de modernización de la educación superior que es radicalmente tecnocrático, formalista y que lejos de mejorar la calidad de la educación está contribuyendo a un deterioro de los procesos académicos de las instituciones universitarias y de la educación superior en general...” Lo que los docentes (como último eslabón del proceso) percibimos, es que bajo criterios “eficientistas” deberemos “transmitir” a nuestros estudiantes “*saberes objetivos, convencionales y utilizables*”, deberemos constituirnos en un medio que permita “*transmitir el máximo conocimiento en el menor tiempo posible*”. Estas directrices equivocadas nos llegan disimuladas hábilmente en eufemismos como “*educación moderna*” o “*educación de excelencia*”. Sobre estos conceptos hace una exposición clara y completa Ibarra¹²².

¹¹⁹ Piaget, J. *The Construction of Reality in the Child*. Basic Books New York 1954.

¹²⁰ Ruiz, A. *Educación Superior y Globalización: Educar ¿para qué?* Plaza y Valdés México. 2001.

¹²¹ Díaz B, et al. *Efectos de la Política de Modernización Educativa en la Educación Superior en México. Problemáticas y Críticas*. En “La Identidad en la Educación Superior en México”, Coordinador Guillermo Villaseñor. Educación Superior Contemporánea, México. 1997

¹²² Ibarra, C. E. *La Universidad ante el espejo de la excelencia*. Enjueros Organizacionales, UAM Iztapalapa, México. 1993.

Si estamos interesados en formar en nuestras instituciones a *hombres cultivados* en el sentido que los define Weber¹²³, en contraposición al *hombre con entrenamiento especializado*, deberemos modificar en esencia nuestros enfoques epistemológicos, nuestros métodos de enseñanza, nuestra concepción del proceso educativo y lo que es más importante, nuestra actitud ante el establecimiento de las políticas educativas del gobierno; al respecto, opina la Sra. Katarina Tomasevsky¹²⁴, Relatora Especial de la ONU, “...El problema más grave es que las organizaciones no gubernamentales y las instituciones académicas no están cuestionando las políticas y prácticas del gobierno de México, que está liberalizando el comercio en la educación como si se tratara de una mercancía...”, “...México y varios países de América latina están siguiendo el modelo estadounidense que no concibe la educación como un derecho, sino como una mercancía sujeta a las leyes del mercado...”

Afortunadamente, un grupo (cada día más numeroso) de investigadores en el área de la educación, a través de varios estudios ha venido demostrando que el ser humano no es fácilmente moldeable desde el exterior ya que éste, cada vez que recibe estímulos, los selecciona, los analiza, los procesa y les confiere significados. Esto evidencia claramente lo infructuosa que resulta la enseñanza exclusiva o esencialmente expositiva y por tanto, han venido privilegiando las propuestas didácticas que procuran la actividad constructiva del estudiante en el proceso de adquisición del conocimiento, colocando al profesor como un orientador o facilitador del aprendizaje, a quien corresponde generar los mecanismos que permitan, en la medida de lo posible, establecer las relaciones entre el estudiante y la disciplina científica, buscando que el alumno se convierta en un componente activo del proceso de enseñanza-aprendizaje.

Algunas formas de abordar los problemas educativos.

Las investigaciones realizadas sobre la formación de conceptos y procesos cognitivos, han puesto de manifiesto el conjunto de problemas que conlleva el aprendizaje de los conocimientos científicos, así como algunas estrategias de enseñanza que han mostrado ser efectivas para coadyuvar a su construcción.

Flores y Gallegos¹²⁵ consideran que, entre otros, los problemas que se enfrentan en la actualidad, originados por las prácticas usuales de la enseñanza de la ciencia, son:

- ❖ Simplificación y modificación de conceptos que coadyuvan al desarrollo de errores conceptuales.
- ❖ Estructuración de contenidos sin tomar en cuenta el nivel de desarrollo de los estudiantes.
- ❖ Concepción memorística del aprendizaje
- ❖ Descontextualización de los conceptos científicos con las representaciones propias de los estudiantes.

Mencionan también, que la enseñanza de las ciencias enfocada desde la perspectiva cognoscitiva ha hecho emerger un problema de capital importancia ¿Cómo se generan en el estudiante

¹²³Weber, M. *Ensayos de Sociología Contemporánea*. Martínez Roca. España. 1972.

¹²⁴ Periódico “La Jornada”, 29 de julio de 2002, página 7. México

¹²⁵Flores, F. Y Gallegos, L. *Consideraciones sobre la estructura de las teorías científicas y la enseñanza de la ciencia*. Perfiles Educativos. No. 61. 1993, UNAM. México

las preconcepciones?, ¿qué las hace invariantes frente a la acción escolar? y ¿cómo es posible modificarlas?.

Sobre la generación de las preconcepciones, afirma Durkheim¹²⁶ que cuando un nuevo orden de fenómenos se convierte en objeto científico, aparece ya representado en el espíritu, no sólo por imágenes sensibles, sino por tipos de conceptos formados groseramente, son ideas que sobrepasan la percepción pura y que encontramos invariablemente mezcladas con las religiones. La reflexión, dice Durkheim, es anterior a la ciencia, que a lo sumo, se sirve de ella con más método. El hombre no puede vivir en medio de las cosas sin forjarse ideas acerca de las mismas, regulando su conducta de conformidad con estas ideas, que están más próximas a nosotros, que las realidades a las cuales corresponden. Estas ideas ocupan el lugar de las realidades y se convierten en la sustancia misma de nuestras especulaciones. Así, en lugar de observar las cosas o los fenómenos a fin de describirlos o compararlos, nos conformamos con cobrar conciencia de nuestras ideas analizándolas y combinándolas, convirtiendo en un análisis ideológico lo que debería ser ciencia de las realidades.

Antes que Durkheim, F. Bacon¹²⁷, afirmaba, cuando se refería al origen de las ciencias físicas, que el rasgo que distingue a la alquimia de la Química o a la astrología de la Astronomía era el método que practicaban los estudiosos de su tiempo, un método que estaba impregnado de *notiones vulgares o praenotiones*, estas preconcepciones no son otra cosa que las preconcepciones que en la ciencia ocupan el lugar los hechos, convirtiéndose en los *ídola* que desfiguran el verdadero aspecto de las cosas y que, sin embargo, confundimos con las cosas mismas.

Sugerencias sobre la actitud del profesor

Según quedó establecido en el apartado anterior, invariable e inevitablemente, enfrentaremos en el ejercicio cotidiano de nuestra labor, a las preconcepciones de los estudiantes y queda claro que, sin experiencias previas y sin conocimientos previos de los alumnos (equivocados o no) no sería factible ayudar a que el estudiante construyera un conocimiento contextualmente válido¹²⁸

Par a realizar eficientemente nuestra labor, partamos de que los estudiantes tienen predisposición para llevar a cabo el aprendizaje que se les plantea, que dicha predisposición surge como resultado de la convergencia de un gran número de factores tanto personales como sociales, para cada estudiante. Entre otros, podemos citar como de origen personal: sus experiencias anteriores, autoestima, habilidades motrices e intelectuales, sus expectativas y representaciones de los nuevos contenidos y su motivación intrínseca. Entre los factores externos al alumno encontramos: las características de las tareas encomendadas (asignaturas, contenidos, actividades, proceso de evaluación, y otras), las características del profesor, de sus compañeros, de la familia, etcétera.

En relación directa con las habilidades tanto motrices como intelectuales del alumno, éste cuenta con un conjunto variado de herramientas y estrategias que ha ido desarrollando en distintos contextos, particularmente en el ambiente escolarizado, podemos citar: los lenguajes adquiridos (oral, escrito, matemático, químico, etcétera), interpretación de gráficos, capacidad para organizar información, tomar notas, leer reflexivamente y muchos atributos más.

¹²⁶ Durkheim, E. *Las Reglas del Método Sociológico*. Pléyade. Buenos Aires. 1976

¹²⁷ Bacon, F. *Novum Organum: Aphorisms concerning the interpretation of nature and kingdom of man. Book. I.* Edited by Urbach & Gibson. London. 1993

¹²⁸ Acbli, (1988) Obra citada

La epistemología genética, originada por los trabajos de Piaget¹²⁹¹³⁰, ha propiciado el desarrollo de una teoría de la cognición, que tiene asiento en los procesos de asimilación y acomodación; supone que la asimilación de una situación conlleva una interpretación mediante la cual dicha situación se vuelve admisible para ser procesada por la estructura cognitiva existente en el sujeto, dando por resultado una forma de conocimiento que, dista mucho de ser una copia simple del dato externo que le es presentado. El conocimiento así concebido no es, ni puede ser, una copia de una realidad externa e independiente del sujeto cognoscente como si esta estuviera preparada y organizada para ser adicionada al intelecto. Así, desde la perspectiva del constructivismo, el aprendizaje es un proceso activo desde el punto de vista del estudiante ya que él modifica, construye, enriquece, diversifica y organiza sus esquemas de conocimiento, partiendo, desde luego, del sentido y significado que puede atribuir a sus preconceptos, a los nuevos contenidos aprendidos y al hecho mismo de haberlos aprendido. Simultáneamente, debido a la naturaleza sociocultural que conlleva el proceso de enseñanza-aprendizaje, este no puede dejarse exclusivamente al alumno, debe existir una planeación externa organizada y sistemática que lo oriente y guíe en la dirección que cada currículo prevea como intenciones educativas¹³¹.

Tomando como base lo que se ha establecido en los párrafos anteriores, resulta razonable afirmar que, la pedagogía de las ciencias debería partir de la visión propia de los estudiantes. No es posible que el profesor siga pensando que el conocimiento científico puede “darse” o “transmitirse” simplemente por medio de las clases expositivas o de la asignación de series de ejercicios, que por lo general realizan unos pocos estudiantes y la mayoría de ellos solamente copian “para cumplir” y lo único que se logra de esta manera es hacer nuestra labor (y la de los estudiantes) pesada y tediosa.

El profesor debe tener clara la necesidad de que el estudiante se apropie del conocimiento, que “lo conquiste”, es decir que *debe construir su conocimiento* y para lograrlo, es condición indispensable que cambie su relación con el conocimiento, debe pasar de ser un “receptor pasivo” para convertirse en un actor de su propia formación.

El papel que el constructivismo asigna al profesor, según lo conciben Tobin y Tippins¹³², es el de convertirse en un “facilitador del aprendizaje”, el actor que debe construir un puente (o un andamiaje) entre el estudiante y el conocimiento, con intervenciones medidas y adecuadas y para lograrlo es menester que identifique la estructura cognitiva del estudiante, que ubique sus preconceptos, que observe mediante indicadores adecuados la evolución (siempre debe haberla) de sus actitudes frente al conocimiento. Esta indagación debe ser continua, preferentemente directa y debe poder informarnos de los cambios que ocurren en el alumno como consecuencia de nuestras intervenciones. Podemos apoyarnos en el análisis del comportamiento verbal de los estudiantes (lo que dicen y lo que no), de su capacidad para plantear y resolver problemas relacionados con los contenidos curriculares, analizando los trabajos escritos asignados, propiciando también que surjan discusiones sobre los conceptos que se estén tratando. Debemos procurar estimular al estudiante para que desarrolle un espíritu crítico y analítico, que sea capaz de comunicarse con sus compañeros, con los profesores y con el conocimiento mismo. Debemos generar en el estudiante confianza en sí mismo, que desarrolle su

¹²⁹ Piaget, J. *La psicogénesis del conocimiento y su significado epistemológico*. Ariel. México. 1979.

¹³⁰ Piaget, J. (1997) Obra citada.

¹³¹ Wheatley, G.H. *Constructivist perspectives on Science and Mathematics Learning*. Science Education. 75(1).1991

¹³² Tobin, K. and Tippins, D. *Constructivism as a referent for teaching and learning*. Laurence Erlbaum Associates, Publishers. Hillsdale. N.J. 1993

creatividad y algo que es fundamental: el estudiante debe asumir la *responsabilidad de su propia formación*.

Las medidas conducentes para remediar esta situación, pueden ser muchas, una de ellas, es la que aquí se desarrolla y consiste en hacer una propuesta de enseñanza basada en el referente teórico del constructivismo.

Sobre los orígenes de las ideas previas de los estudiantes.

Para esta corriente educativa, según quedó explicado en párrafos anteriores, tienen gran importancia los preconceptos de los estudiantes, en la literatura especializada se le conocen con denominaciones variadas, pueden ser: ideas previas, conocimientos alternativos, prenociones o conceptos erróneos.

Para los estudiantes que se inscriben en el nivel universitario, a los cursos sobre electricidad y magnetismo, hemos identificado dos componentes importantes del surgimiento de sus concepciones alternativas, con orígenes claramente provenientes de la educación escolarizada por un lado y del entorno social y familiar por el otro.

De las influencias de la sociedad mencionaremos en primer lugar, la educación familiar, en donde los padres, para la protección de los niños, siempre son enfáticos en señalar lo peligroso que resulta manipular cualquier dispositivo electrodoméstico, llegando al exceso de impedir a los niños la simple acción de sustituir un foco (bombilla) en una lámpara de alumbrado casero¹³³. Nuestros niños, crecen teniéndole miedo a "la electricidad", involuntariamente creamos en ellos la idea de que es preferible la inacción cuando se requiere manipular los dispositivos eléctricos, en vez de guiarlos a aprender su manejo seguro, a tomar las precauciones necesarias para evitar accidentes. En los niveles de enseñanza media y media superior aun se percibe, que los estudiantes, temen manipular los dispositivos eléctricos y llega incluso a manifestarse un rechazo a la experimentación, en el estudio del electromagnetismo.

Los estudiantes reciben también de la sociedad, un conjunto de datos imprecisos con los que, paulatinamente, estructuran un conocimiento erróneo de los conceptos relacionados con el electromagnetismo. Entre los muchos ejemplos de esta influencia, se pueden citar:

Las compañías que, en México, suministran el "servicio eléctrico", se denominan "Compañía Mexicana de Luz y Fuerza del Centro" y "Comisión Federal de Electricidad". Un niño (o un adulto) no sabe si dichas compañías venden "Luz", "Fuerza", "Electricidad" o alguna mezcla de estos "suministros". En todas los hogares mexicanos se habla de "pagar el recibo de la luz". Cuando falla el servicio, se dice, "hubo un apagón" o bien "se fue la luz". En los medios de información, electrónicos o impresos, frecuentemente se hacen declaraciones como las siguientes: "Alza en las tarifas eléctricas", "Se encarece el fluido eléctrico", "Se viene abajo un transformador de luz", "Auto choca contra una torre de alta tensión", "Se eliminan subsidios en el pago de energía eléctrica", "Urge construir más nucleoelectricas", "Las plantas termoeléctricas son altamente contaminantes", "Fallas en la hidroeléctrica", etcétera. Con esta diversidad de conceptos, aun para alguien que tenga interés al

¹³³ Stocklmayer, S., y Treagust, D (1996). *Images of electricity: how do novices and experts model electric current?* International Journal of Science Education 18(2), 163-178

respecto, le resulta difícil saber qué es lo que cobra la compañía de luz, ¿energía?, ¿electricidad?, ¿luz? ¿fluido eléctrico?, ¿producen lo mismo las hidroeléctricas que las termoeléctricas?, etcétera.

Los anuncios comerciales en la televisión anuncian “pilas con alta energía”, “pilas con poder máximo”, recargables, alcalinas, secas, electrolíticas, solares, especiales para uso electrónico, para uso rudo, etcétera. Un estudiante de bachillerato no sabe si las pilas suministran energía, potencia, corriente eléctrica, carga eléctrica, diferencia de potencial o fuerza electromotriz.

Como puede fácilmente percibirse, la confusión que el lenguaje coloquial provoca en los estudiantes, es enorme.

La componente que, para los fines de este escrito, resulta fundamental, proviene de la instrucción escolarizada, que por razones obvias, tiene influencia realmente importante, en la estructura cognitiva de los estudiantes.

En la enseñanza básica, a los estudiantes se les habla de un “concepto” denominado “electricidad”, que se refiere a una gran diversidad de significados. Con el vocablo electricidad, en diferentes contextos y en diferentes momentos educativos, el profesor puede referirse a carga eléctrica o corriente eléctrica; por lo general, cuando menciona electricidad positiva, se refiere a carga y similarmente, cuando habla de electricidad negativa también se refiere a carga, en ocasiones habla de electricidad estática o de electricidad dinámica, de bioelectricidad, piezoelectricidad, etcétera. Podemos fácilmente percatarnos de que, con el vocablo “electricidad” los profesores se refieren tanto a propiedades como a fenómenos y aun a procesos. Esta imprecisión conduce a que el estudiante posea un “concepto” que puede colocar en muchos lugares de su estructura cognitiva y lo que es grave, que puede tener significados diferentes y en muchos casos, contradictorios.

Un ejercicio docente de más de dos décadas me ha permitido coleccionar un conjunto amplio de conceptos alternativos que poseen los estudiantes, referidos a “la electricidad”, sobre la cual opinan, entre otras cosas:

“.....La electricidad es algo que.....”

- a) Viaja de las fuentes a los dispositivos (con la velocidad de la luz)
- b) Regresa de los dispositivos, a la fuente.
- c) Cuando se clasifica como “electricidad alterna”, es algo que oscila a razón de 60 Hertz (en un sentido y regreso) y sin embargo, alimenta constantemente al dispositivo.
- d) Se gasta (por ejemplo, las pilas se agotan) pero puede recuperarse.
- e) Es “un fluido” que está constituido por electrones.
- f) Puede ser estática, pero los electrones que la constituyen, están en movimiento constante.
- g) Puede ser “monofásica” o “trifásica”.
- h) Su distribución se realiza mediante cables y puede ser: de “alta tensión”, “baja tensión”, “Alto voltaje” o “Bajo voltaje”.
- i) Antes de ser utilizada en los hogares o en las fábricas, debe pasar por unos “transformadores”, pero no se sabe qué es lo que se le transforma.....”

Para la mayoría de los estudiantes, algunos elementos eléctricos como las pilas o los generadores eléctricos, son:

- a) Recipientes que contienen y suministran carga eléctrica.
- b) Cuando se les acaba la carga eléctrica, se pueden recargar.
- c) Suministran siempre la misma corriente eléctrica.

Los materiales pueden ser caracterizados en función de que:

- a) Dejan pasar a los electrones (conductores).
- b) Impiden el paso de los electrones (aisladores).
- c) Se calientan cuando pasan los electrones (resistores).
- d) En algunas ocasiones dejan pasar a los electrones y en otras se oponen (semiconductores).

Los libros de texto tienen gran influencia en estas concepciones alternativas. Por ejemplo: Gerrish¹³⁴ explica: Franklin sugirió que "*la electricidad consistía en muchas partículas cargadas eléctricamente*" (p. 21). También afirma, "*la unidad de presión eléctrica o tensión o potencial es el voltio*" (p.21). En la página 30 de dicho libro se define a la "*energía eléctrica del calor*" y explica su existencia mediante el funcionamiento de un termopar; Domínguez¹³⁵, define: "*La corriente eléctrica consiste en un transporte de electrones a través de un conductor, semejante a una corriente de agua*"..... "*en la corriente eléctrica, el escurrimiento de los electrones....*" (p.257).

Como bien puede comprenderse, algunos párrafos que, tomados fuera de contexto pudieran parecer equivocados, en muchas ocasiones provienen de prácticas didácticas adoptadas desde hace mucho tiempo, como es, por ejemplo, el intentar explicar a los estudiantes el comportamiento de las corrientes eléctricas, tomando como punto de partida, la analogía con el movimiento de agua en una tubería, véase Resnick¹³⁶, Esta analogía (y otras similares) pueden ser adecuadas en un momento dado, sin embargo, si el profesor no es cuidadoso al manejarlas, puede provocar que los estudiantes terminen creyendo, por ejemplo, que las pilas son fuentes de carga eléctrica (como si fueran recipientes con agua), misma que circula por los conductores, los cuales son considerados como tubos vacíos, que permiten circular a dichas partículas, las cuales se mueven con la rapidez de la luz.

En otros casos, se intenta explicar a los estudiantes, los conceptos científicos, usando en el proceso los vocablos que se usan fuera del aula, ya sea en el comercio o en los centros de trabajo, por ejemplo, cuando se les pide utilizar "una fuente de poder", los estudiantes quedan convencidos de que una fuente de poder, puede suministrar potencia, corriente eléctrica, diferencia de potencial, carga eléctrica, pulsos o señales, según el dispositivo multifuncional que estén utilizando en las prácticas escolares. En muchas ocasiones, el estudiante termina creyendo que el nombre del dispositivo que emplea, es la marca comercial del aparato.

¹³⁴ Gerrish, H. *Fundamentos de Electricidad*. Limusa. México. 1984.

¹³⁵ Domínguez, R. *Curso elemental de física*. Porrúa. México. 1961

¹³⁶ Resnick, R., Halliday, D. y Krane. *Física Vol. II*. CECSA. México. 1992.

En México, también tenemos una fuente importante de conceptos erróneos, que provienen de las traducciones de otros idiomas al español. Por ejemplo, véase el libro de Resnick¹³⁷, en donde aparecen los siguientes párrafos:

Página 72 ".....y dejemos que a sea una distancia L en la dirección del campo desde b " [Lo que el autor dice es: la distancia entre a y b es L]

Página 127 ".....La caja puede contener un resistor, un motor o un acumulador" [acumulador es palabra usada en México, para denotar a las baterías de los automóviles]

Página 160 ".....Una carga eléctrica en movimiento o una corriente eléctrica generan un campo magnético, el cual puede entonces ejercer una fuerza magnética sobre otras cargas o corrientes en movimiento..." [el autor dice: ...sobre otras cargas en movimiento o corrientes]

Página 164 ".....La fuerza magnética deflectora tiene dos propiedades que afectan a las trayectorias de las partículas cargadas (1) no cambia la velocidad de las partículas...." [el autor dice que no cambia la rapidez de las partículas]

La educación escolarizada, por supuesto, está enmarcada en la filosofía educativa, pero en esta tesis, no se pretende analizarla con ese enfoque, más bien, esta tesis aborda el problema con énfasis en la teoría educativa, entendiéndola por ésta *al conjunto de los diversos enfoques generales y sistemáticos, las metas, los métodos y contenidos de la educación* que, como casi todo producto de la mente humana, no es estática sino que se desarrolla continuamente, cambiando para adecuarse constantemente al concepto que se tenga del proceso mismo y de los problemas que plantea y pretende resolver.

Sobre las teorías educativas. ¿De dónde partir?

Un punto de partida, arbitrario desde luego, pero razonablemente correcto para ubicar la propuesta que se hace en esta tesis, consiste en referirnos a la teoría educativa que en forma casi generalizada, prevalecía en las instituciones mexicanas de educación media y universitaria, a finales de la década de los 50's y a inicio de los 60's cuando, tras la publicación, en 1948, de la novela *Walden II*, escrita por Skinner¹³⁸, que se refiere a una utopía planeada científicamente y cuyo contenido fue expresado de manera sistemática en un trabajo posterior¹³⁹, publicado en el año de 1953; Las instituciones de educación adoptaron, con diferentes niveles de aceptación, los principios educativos planteados por Skinner, asentados en la teoría psicológica que recibe el nombre de "conductismo".

Las implicaciones filosóficas del planteamiento de Skinner, si bien tienen gran importancia, no serán analizadas aquí. Lo que nos atañe, son los resultados observables que aun se logran, en la educación escolarizada de los alumnos, como consecuencia de haber adoptado (y que aun persisten) los postulados de la teoría educativa que Skinner¹⁴⁰ denominó "condicionamiento operante", procedimiento que derivó de los experimentos realizados por Pavlov¹⁴¹ y las leyes del aprendizaje

¹³⁷ Resnick, R. (1992). Obra citada.

¹³⁸ Skinner, B. *Walden Two*. Mac Millan. New York. 1948.

¹³⁹ Skinner, B. *Science and Human Behavior*. Mac Millan. New York. 1953

¹⁴⁰ Skinner, B. *Más Allá de la Libertad y de la Dignidad*. Fontanella. Barcelona. 1971.

¹⁴¹ Pavlov, I. *Reflejos condicionados e inhibiciones*. Ediciones Península. Barcelona. 1979.

animal postuladas por Thorndike¹⁴², que culminaron con la elaboración de Skinner de las "máquinas didácticas" y la "enseñanza programada", que tuvieron una enorme influencia en el sistema educativo de los Estados Unidos de América y México.

Como antes se mencionó, las ideas de Skinner fueron adoptadas por la mayoría de las instituciones de educación media y universitaria. En la década de los 70's se vivió un frenesí por adecuar los sistemas de enseñanza a los "métodos modernos" planteados por Skinner. Se impartían cursos de didáctica para aplicar el condicionamiento operante, se diseñaban nuevos programas de estudios y de asignaturas, "todo debería estar planeado con anticipación", los objetivos de "enseñanza" y "aprendizaje" campeaban por los escritos, para cada caso, se planteaban objetivos generales, intermedios, específicos, terminales, operacionales, esenciales, complementarios, accesorios, etcétera. Se publicaron libros de "enseñanza programada" para todos los niveles, desde primaria hasta la universidad¹⁴³.

El caso particular de la enseñanza de las ciencias, vio nacer un conjunto de propuestas entre las que destaca la que recibió el nombre de "tecnología educativa", corriente que recibe la influencia, casi absoluta, de los postulados de Skinner y cuyos representantes más conspicuos fueron: Bergvall, P. de la universidad de Uppsala, Suecia, Báez, A. Director del Departamento de Enseñanza de las Ciencias de la UNESCO, Lumsdaine, A., de la universidad de Chicago, Gagné, R., de la Universidad de Pittsburg y Zaki, C., de la Universidad de Sao Paulo, entre otros. Estos investigadores concebían que la aplicación sistemática de conocimientos científicos y tecnológicos a problemas de educación, resolvería el problema de "educar a grandes masas de individuos" y para ello, consideraban algunas "tecnologías" adicionales, como eran: tecnología del comportamiento, de la información, de la comunicación, de la instrumentación¹⁴⁴, etcétera.

Esta corriente educativa, desembocó en una planeación didáctica¹⁴⁵, misma que, si se realizaba de manera correcta, preveía todos los momentos educativos, evitaba "fallas" en el proceso de enseñanza-aprendizaje y no dejaba nada "a la improvisación". Se debían planear cuidadosamente, las experiencias de aprendizaje, los objetivos, las evaluaciones, las lecturas, las tareas, la supervisión a los profesores, los recursos didácticos, las estrategias, la bibliografía tanto para los estudiantes como para los profesores, los auxiliares de la enseñanza, las visitas, los ejemplos¹⁴⁶, etcétera.

La realidad mostró que los beneficios de ese planeamiento didáctico, la tecnología educativa y la aplicación de las teorías conductistas, estaban realmente lejos de lograr lo que pretendían¹⁴⁷.

Desde luego, las ideas educativas de Skinner no era únicas, con ellas coexistieron otras como las de A. S. Neill, que fue denominada "escuela progresiva" y cuyas ideas fueron sistematizadas en alrededor de veinte libros que publicó Neill¹⁴⁸ y de las cuales, la más conocida fue sin duda "Summerhill" en donde planteaba como debería de ser la educación del niño. Sus ideas eran totalmente contrapuestas a las de Skinner ya que basaba su teoría pedagógica en la libertad absoluta del niño, al

¹⁴² Thorndike, E. *Animal Intelligence: Experimental Studies*. Mac Millan New York. 1911.

¹⁴³ Huerta, J. *La Clasificación de los Objetivos de Aprendizaje. Su función y Utilidad*. Trillas. México. 1978.

¹⁴⁴ Zaki, C. *Tecnología de la Educación*. CECSA. México. 1977.

¹⁴⁵ Kemp, J. *Planeamiento Didáctico*. Diana. México. 1972.

¹⁴⁶ Gago, A. *Elaboración de Cartas Descriptivas. Guía para preparar el programa de un curso*. Trillas. México. 1978

¹⁴⁷ Matthews, M. (1994). Obra citada.

¹⁴⁸ Neill, A.. *Summerhill: A Radical Approach to Education*. Penguin. London. 1968.

que debería dársele la enseñanza sólo cuando la solicitara y, por consecuencia lógica, la coerción de cualquier tipo, estaba fuera de la consideración del profesor¹⁴⁹.

La teoría educativa de Neill, por sus características, si bien tuvo una gran influencia en el proceso educativo en México, no fue ensayada. Sólo algunas escuelas de enseñanza primaria (de carácter privado), adoptaron las concepciones de Neill. La educación pública de México¹⁵⁰, cuyo peso porcentual es muy grande, nunca incursionó en el establecimiento formal de esta teoría.

Coexistieron también, con las ideas de Skinner, las de Iván Illich, quien postulaba que la escuela debería ser abolida como institución principal del proceso educativo¹⁵¹. Estas ideas, evidentemente, no fueron puestas en práctica, sin embargo, son, junto con las aportaciones de Neill, las que provocaron reflexiones y debates en las academias. En las escuelas de pedagogía se discutieron y compararon los planteamientos de Skinner con los de Neill y sus seguidores, se analizaron los resultados obtenidos en las instituciones de educación y desembocaron en una gran diversidad de propuestas educativas, muchas de ellas aun se encuentran en fase de ejecución y cuyas bondades o deficiencias aun se valoran. De estas propuestas educativas, analicemos brevemente la que hizo Ausubel y cuya elección entre otras muchas teorías, obedece a que, en los aspectos que se van a destacar, sus postulados, son diametralmente opuestos a los de Skinner, pero además de ser una corriente educativa que se ha ensayado en diversas instituciones educativas, goza de la ventaja de contar con una aceptación amplia entre los docentes.

Desde la década de los 60's, Ausubel¹⁵², propuso una teoría educativa que llamó "teoría del aprendizaje significativo", en la cual, el concepto más importante es precisamente el aprendizaje significativo, al que define como un proceso mediante el cual una información se relaciona de manera no arbitraria y no literal con un aspecto relevante de la estructura cognitiva del estudiante (subsumidor). Este concepto se contraponen a lo que el mismo Ausubel define como aprendizaje mecánico, en el que nuevas informaciones son aprendidas, prácticamente sin interacción con la estructura cognitiva, son almacenadas de manera arbitraria y literal (es decir, memorizadas temporalmente) y consecuentemente, resultan ser poco útiles en el momento de querer usar o transferir a otro ámbito, esos conocimientos.

La teoría de Ausubel fue ampliada con posterioridad por el mismo Ausubel y Novak¹⁵³, de la Universidad de Cornell. En esta teoría, que ahora se denomina Teoría del aprendizaje significativo de Ausubel y Novak, se parte de la idea central de que los seres humanos hacen tres cosas: piensan, sienten y actúan y por lo tanto, para educar a cualquier persona se deberán atender estos tres aspectos. Novak establece cinco elementos en su teoría: estudiante, profesor, conocimiento, contexto y evaluación. Considerando estos cinco elementos, afirman Ausubel y Novak, que cualquier evento educativo implica las acciones necesarias y suficientes para intercambiar significados y sentimientos entre el estudiante y el profesor; el objetivo de ese intercambio es el aprendizaje significativo de un nuevo conocimiento contextualmente aceptado.

¹⁴⁹ Neill, A. *Freedom-Not License*. Hart Publishing Co. New York. 1966.

¹⁵⁰ Bravo, V. Y Carranza, J. *La Obra Educativa*. SEP. México. 1976.

¹⁵¹ Illich, I. *Deschooling Society*. Traducido y Publicado por CIDOC, México. 1971.

¹⁵² Ausubel, D., *Educational Psychology*. Holt Rinehart & Winston. New York. 1978

¹⁵³ Ausubel, D. Novak, J. & Hanessian H. *Psicología Educativa: Un punto de vista cognoscitivo* Trillas. México. 1998

Es conveniente hacer notar que las ideas centrales de la teoría educativa de Ausubel y Novak descansan en la consideración de que en el evento de intercambio de significados existe también, un intercambio de sentimientos entre el estudiante y el profesor (una experiencia afectiva). Algunos rasgos distintivos de la teoría educativa de Ausubel y Novak¹⁵⁴ son:

- ❖ El aprendizaje significativo requiere de cinco componentes fundamentales: Disposición del estudiante para aprender, materiales potencialmente significativos, disposición del profesor para enseñar, contexto y evaluación.
- ❖ El conocimiento humano es construido; el aprendizaje significativo subyace a esa construcción.
- ❖ El conocimiento previo del estudiante tiene gran influencia sobre el aprendizaje significativo de nuevos conocimientos.
- ❖ Los conocimientos adquiridos por medio del aprendizaje significativo son muy resistentes al cambio.

De estos aspectos de la teoría de Ausubel y Novak, podemos destacar las grandes diferencias con la teoría del condicionamiento operante, pues aquí se afirma que sólo resulta significativo lo que quiere aprenderse, (no lo que otro planifique que debemos aprender) y también debe resaltarse que un aspecto fundamental de esta teoría, son los conocimientos previos del estudiante, lo que al mismo tiempo constituye una debilidad, ya que los autores mismos aceptan que los conocimientos previos de los estudiantes, son muy resistentes al cambio.

La comparación, casi obligada, de las teorías educativas que proponen, por un lado Skinner y sus seguidores y por el otro, Ausubel y Novak, nos hace notar que si bien, difieren sustancialmente en cuanto a qué aprender y cómo aprender, tienen un rasgo común. Ambas corrientes, de manera tácita aceptan que la ciencia tiene una existencia *per se*, es decir, independiente de los conocedores y ambas corrientes aceptan que buscamos "la verdad".

La última vía que será abordada, se refiere al constructivismo, referente teórico ya descrito y del que se destacará lo siguiente:

A partir de la segunda mitad de la década de los 80's, Ernst Von Glasersfeld¹⁵⁵, publica varios artículos relacionados con lo que actualmente conocemos como el "constructivismo radical", al que no se postula como una teoría, en sentido lato sino como un referente teórico.

En contraposición a los escépticos, filósofos del siglo V antes de nuestra era, quienes mostraron la imposibilidad lógica de establecer *la verdad* en cualquier rama del conocimiento, en virtud de que, la comparación necesaria con *la realidad* sólo podía hacerse, a través de un acto de conocimiento. Glasersfeld refutó que el conocimiento representara un mundo independiente de los conocedores; Afirmó que el conocimiento representa, lo que podemos hacer en nuestro mundo experiencial, las formas exitosas de tratar con los objetos físicos; aceptó la existencia de una *realidad absoluta*, pero afirmó que, nunca podremos conocerla y además, que el significado de *existir*, sólo podía definirse en el ámbito de nuestra experiencia y no ontológicamente. Ubicó al constructivismo como una forma en la cual los conocedores construyen el conocimiento viable (es decir, en relación

¹⁵⁴ Ausubel, Novak y Hanessian. (1998). Obra citada.

¹⁵⁵ Von Glasersfeld E. *A Constructivist Approach To Teaching* en Steffe & Gale Eds. *Constructivism in Education*. Laurence Erlbaum Associates Publishers. Hillsdale N.J. 3-16. USA 1995.

directa con el contexto, las metas y los propósitos) y no en relación con “la búsqueda de la verdad absoluta”; Concedió gran importancia al hecho de que, la viabilidad del conocimiento no es una apreciación personal sino social. Tobin y Tippins¹⁵⁶ mencionan que, en el caso particular del salón de clases, el profesor, representando a la sociedad, construirá ambientes que faciliten al alumno, el aprendizaje (la construcción) del conocimiento considerado como viable.

Tobin y Tippins explican su concepción del constructivismo, como una forma de realismo, en el sentido de que, la existencia de la realidad, es un reconocimiento del mundo exterior, pero aclaran que, sólo podemos conocer esa realidad, de manera personal y subjetiva. Explican que existen aspectos en los que nuestro conocimiento, es tanto individual como social, en cuyo caso, podemos negociar y alcanzar acuerdos con la sociedad, respecto de ese conocimiento y podemos construir modelos, pero no importa cuan refinado y elegante sea dicho modelo, éste no podrá reclamar que representa a *la verdad absoluta*.

“Nuestro modelo, afirman Tobin y Tippins, como cualquier conocimiento, evoluciona a través del proceso de negociación y de construcción mediante el consenso, pero sujeto a las constricciones que impone la experiencia y como no podemos tener contribuciones objetivas a nuestro modelo, no podremos saber cuán cerca estamos de la realidad absoluta, sólo podremos estar seguros, de que nosotros conocemos algo, de manera personal, mediado dicho conocimiento, socialmente”¹⁵⁷.

El conocimiento es aceptado por la comunidad científica, como viable, cuando se ajusta con la experiencia y es coherente con otros conocimientos, por lo tanto, está sujeto a verificación empírica.

Es así que, la perspectiva constructivista, reconoce la existencia de una realidad externa, pero asume que los conocedores jamás podrán saber qué es.

Como fácilmente puede colegirse, la diferencia fundamental, en lo que al proceso educativo se refiere, del constructivismo con las corrientes educativas mencionadas, particularmente con la teoría de Skinner y la de Ausubel y Novak es, en primera instancia, la concepción constructivista de que la ciencia no existe como un cuerpo de conocimientos, separado de los conocedores. Por el contrario, la ciencia es un conjunto de entendimientos, socialmente negociados, de los fenómenos y eventos que forman al universo experimentado. Esta concepción, necesariamente modifica en su esencia más íntima, la actividad y la actitud del profesor en el proceso de enseñanza aprendizaje. De facto, nos coloca ante una realidad que nos dice que no podemos “transmitir” un conocimiento ya que el conocimiento es construido personalmente y mediado socialmente, es decir, el conocimiento sólo existe en la mente del sujeto cognoscente y por tanto, no es algo susceptible de ser transmitido; En cada caso será construido.

Desde luego, la concepción del constructivismo de Glaserfeld, no es la única existente, los orígenes de la corriente, se remontan a los escritos de Sócrates¹⁵⁸. En nuestra época, las principales aportaciones provienen de Piaget (Teoría Genética) y Vigotsky (Psicología Sociocultural), cuyas concepciones podríamos ubicar en los extremos del constructivismo y cuya parte central está cubierta

¹⁵⁶ Tobin, K. and Tippins, D. (1993) Obra citada.

¹⁵⁷ Tobin, K. and Tippins, D. (1993). Pg. Obra citada.

¹⁵⁸ Plato, *Protagoras and Meno*. Penguin Harmondsworth. London. 1956.

por una amplia gama de concepciones, manifestadas y defendidas por investigadores distinguidos, pero los resultados obtenidos por unos y otros, aun se valoran.

Las diferencias más notables entre las teorías de Piaget y Vigotsky se refieren al proceso de construcción del estudiante ya que en tanto que la teoría genética establece que dicho proceso es de naturaleza esencialmente individual, la psicología sociocultural de Vigotsky afirma que dicho proceso de construcción es esencialmente colectivo.

Los intentos de hacer una síntesis entre ambas teorías, han sido infructuosos, en particular Coll¹⁵⁹ hace un análisis lúcido entre las posibilidades de hacer sustituciones entre ambas teorías, hacer una agregación o bien, hacer una integración. Cada una de estas acciones conlleva a diferentes dificultades.

En esta tesis se ha aceptado el riesgo que menciona Coll de que el proceso de agregación conlleva todas las ventajas y todos los inconvenientes del eclecticismo y del pragmatismo, como estrategias epistemológicas para el estudio del proceso de construcción en el aula y no sólo eso, además, se aceptan las recomendaciones hechas por Fosnot¹⁶⁰ de utilizar al constructivismo como “un método de enseñanza” basado en las preconcepciones de los estudiantes, negociando los significados en pequeños grupos de estudiantes a través de discusiones interactivas. Asimismo, estamos conformes con las recomendaciones de Wheatley¹⁶¹ en cuanto a la asignación de roles tanto para los estudiantes como para el profesor y, fundamentalmente estamos de acuerdo con la concepción de Tobin y Tippins¹⁶² en el sentido de que el constructivismo es una herramienta para la reflexión crítica que fortalece y capacita al profesor para desarrollar su labor, para planear e implementar estrategias que atiendan a las necesidades académicas de sus estudiantes.

Secuencia temática para el curso sobre electricidad y magnetismo

De conformidad entonces, con lo arriba señalado, la secuencia de enseñanza que, para impartir un curso sobre teoría electromagnética a nivel licenciatura, se sugiere, es la siguiente:

En primera instancia, procurar que el estudiante construya el concepto general de campo y a continuación, presentarles al campo eléctrico \vec{E} y al campo magnético \vec{B} , como componentes vectoriales del campo electromagnético, lo que facilitará la comprensión de las transformaciones de las componentes del campo electromagnético entre diferentes sistemas de coordenadas en movimiento relativo.

Una vez logrado lo que se propone en el párrafo anterior, se sugiere presentar dos postulados:

1. Ley de Faraday de la Inducción Electromagnética. (Primera Ecuación de Maxwell)
2. Ley de Ampere-Maxwell. (Segunda Ecuación de Maxwell)

¹⁵⁹ Coll, C. *La teoría genética y los procesos de construcción del conocimiento en el aula*. Paidós Educador. México. 1999

¹⁶⁰ Fosnot, C. *Constructivism: Theory, Perspectives and Practice*. Hardcover. New York. 1996.

¹⁶¹ Wheatley, G. *Constructivist perspectives on Science and Mathematics Learning*. Science Education 75(1). 1991

¹⁶² Tobin, K. and Tippins, D. (1993). Obra Citada.

Dado que en el espacio vacío las dos ecuaciones son complementarias, tenemos argumentos aceptables para tratarlas simultáneamente.

Si la secuencia sugerida hasta este momento, se llevara a cabo con el método tradicional de la enseñanza de las ciencias, basado fundamentalmente en la exposición oral del profesor, con la participación obligada y dirigida de los alumnos, en un curso en donde se asignen algunas lecturas y series de ejercicios que deberán ser resueltos por los alumnos, esta propuesta tendría poco valor didáctico ya que sólo se estaría haciendo una sugerencia de orden en el tratamiento de los contenidos temáticos, siguiendo un enfoque cuya parte medular consistiría en presentar las ecuaciones de Maxwell como postulados en lugar de deducirlas con base en resultados teóricos y/o experimentales (lo cual no podría considerarse como una propuesta original).

En sus investigaciones sobre psicología genética, Piaget¹⁶³ hace la hipótesis de que existe un paralelismo entre el progreso realizado en la organización lógica y racional del pensamiento y los correspondientes procesos psicológicos formativos, lo que interpreto como el establecimiento de un paralelismo entre la forma de pensar de los estudiantes y la historia de la ciencia. Gallegos¹⁶⁴ encuentra que las ideas de los estudiantes coinciden, de manera puntual con ciertos aspectos de los modelos históricos pero no con sus elementos teóricos generales y sugiere un modelo pedagógico que tome como punto de partida la incorporación de los modelos que utilizan los estudiantes y trabajarlos desde una perspectiva histórica cuya intención sea la de completar los modelos de los estudiantes que son parcialmente similares a los modelos históricos.

Esta ideas sugieren que, el análisis histórico del surgimiento y evolución de las diferentes teorías, hasta el establecimiento de la teoría electromagnética de Maxwell, constituirá un coadyuvante de importancia para la construcción del conocimiento colectivo de la teoría. Así, de manera congruente con el constructivismo, se hace la siguiente:

Propuesta

Que habrá de llevarse a cabo cumpliendo las siguientes condiciones:

- ❖ Tanto el plan de estudios como el programa de la asignatura se considerarán documentos de observancia obligatoria, en virtud de que así lo establece el artículo 3 del Estatuto del Personal Académico de la UNAM. Podemos, en el programa de la asignatura, cambiar el orden, variar la intención de los temas, plantear enfoques diferentes, planear estrategias didácticas, modificar los tiempos asignados a cada tema, etcétera, pero no podemos obviar el programa, según lo establece el inciso I del artículo 6 del mismo ordenamiento.
- ❖ No podemos seleccionar a los estudiantes, ni exigir requisitos adicionales a los que establece el plan de estudios. Como ya fue explicado, son los alumnos los que solicitan y obtienen inscripción a los cursos y no los profesores quienes los seleccionan.
- ❖ Los estudiantes poseen preconceptos que habremos de considerar, en ocasiones reforzándolos y en otras, modificándolos.

¹⁶³ Piaget, J. *Estudios de Psicología Genética*. Emecé Editores, Argentina. 1997.

¹⁶⁴ Gallegos, L. *Comparación entre la evolución de los conceptos históricos y las ideas de los estudiantes*. Tesis Doctoral. UNAM. México, 2002.

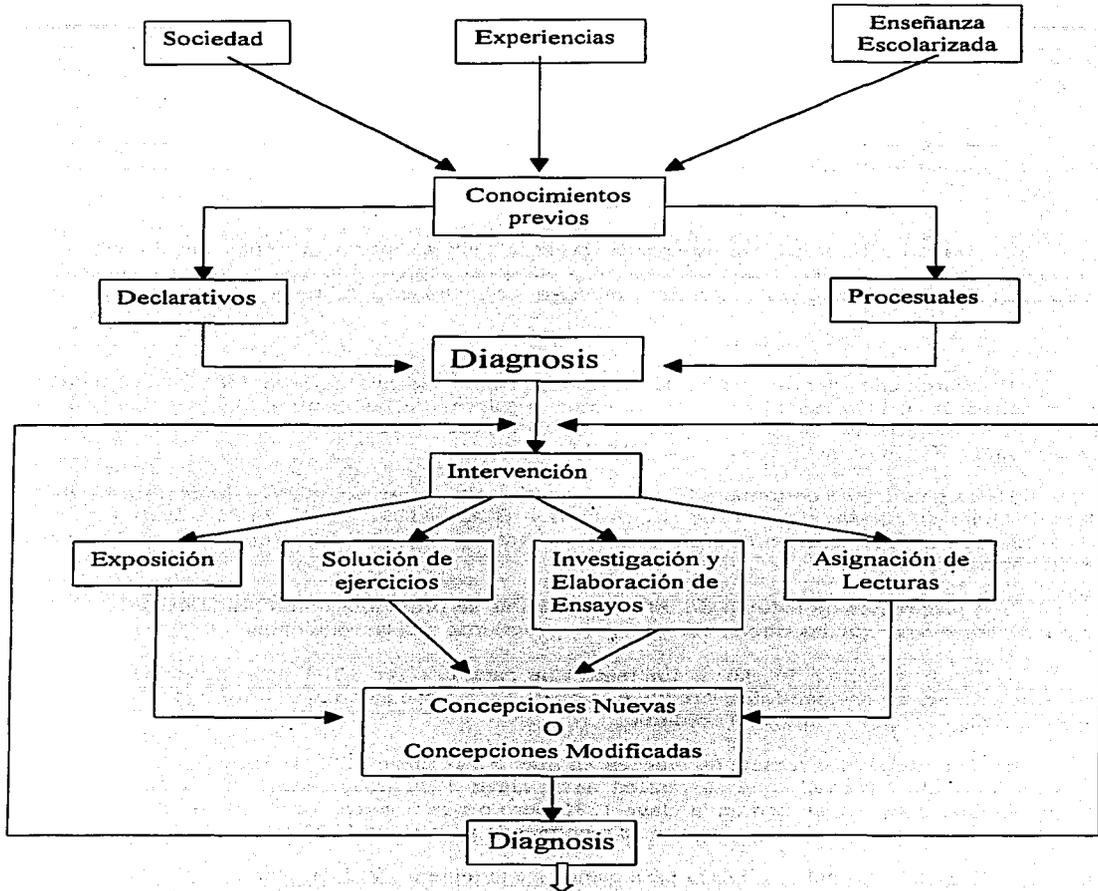
- ❖ Debemos cuidar de no exceder el tiempo asignado al curso en el plan de estudios, tanto en el aula como en los trabajos y asignaciones fuera del aula, puesto que, los estudiantes planean sus actividades en función del número de créditos asignados a cada materia, es decir, el número de créditos les es un indicador del tiempo que deben y pueden dedicar al estudio de la asignatura.
- ❖ Debemos cumplir con los ordenamientos institucionales referentes a la normatividad para la promoción y certificación. El estudiante conoce y actúa conforme a lo que indican los reglamentos de inscripciones y exámenes, formas en que el profesor debe presentar las “calificaciones”, número de exámenes ordinarios, etcétera.

Con el método que a continuación se detalla:

- a) Es sugerencia de esta propuesta que para el desarrollo del curso, se tomarán en cuenta los problemas previamente conocidos, que ha presentado la construcción de la teoría electromagnética, por lo que se partirá de una propuesta inicial que evite la deducción teórico fenomenológica de las ecuaciones de Maxwell, proponiendo dichas ecuaciones como postulados y en todo momento del desarrollo del curso, se retomarán dichas ecuaciones.
- b) Crear la zona de desarrollo próximo, para intervenir en ella.
- c) La indagación de la zona de desarrollo próximo, necesariamente hará evidentes los problemas de orden conceptual que los estudiantes del grupo tengan y se buscará intervenir para resolverlos. Se procurará que la intervención sea directa e inmediata. Es decir, los problemas conceptuales se irán abordando en el momento que surjan, evitando que se vayan adicionando.
- d) De conformidad con la postura adoptada de hacer una agregación entre las concepciones de Piaget y Vigotsky, se procurará mantener un equilibrio entre las construcciones individuales y colectivas.
- e) Las intervenciones, en los aspectos problemáticos referidos a los conceptos, utilizarán como apoyos fundamentales: Las analogías, experimentos pensados, casos al límite, historia de la física y extrapolaciones a los problemas actuales en el campo de la tecnología y la química.

Esquemáticamente, la ejecución que se propone es la siguiente:

Diagrama de ejecución de Propuesta



b) Objetivos.

- ❖ Facilitar al estudiante la construcción de su conocimiento sobre la teoría electromagnética de Maxwell.
- ❖ Reducir el índice de abandono del curso.
- ❖ Coadyuvar para que el estudiante adquiera o incremente su motivación intrínseca para conocer la teoría electromagnética de Maxwell.
- ❖ Dar a conocer a los alumnos y a otros profesores, algunos datos histórico-filosóficos, relevantes para la construcción de la teoría electromagnética de Maxwell, propiciando con ello la reflexión sobre su práctica docente.
- ❖ Ofrecer a los docentes un método alternativo, de enseñanza, sobre la teoría electromagnética de Maxwell.

c) Hipótesis

Utilizando esta propuesta de enseñanza de la Teoría Electromagnética de Maxwell, basada en el referente teórico del constructivismo y con el apoyo heurístico de la historia del electromagnetismo, los estudiantes construirán un mejor conocimiento del tema.

d) La muestra

El grupo con el que ensayé la propuesta, fue el grupo número 08, correspondiente al semestre lectivo 2000-I integrado por 44 alumnos regulares de las carreras de Química, Ingeniería Química, Química Fármaco-Biológica, Química en Alimentos e Ingeniería Química Metalurgista, que se imparten en la Facultad de Química de la UNAM.

La asignatura se denomina “Electromagnetismo” y aparece en los planes de estudio de la Facultad de Química, con las claves 1203 (I.Q; I.Q.M y Q.A.) y 1232 (Q. Y Q.F.B.). Para la carrera de I.Q., la asignatura se imparte en el tercer semestre, en tanto que para las otras cuatro carreras pertenece al segundo semestre.

Los programas de estudio de estas asignaturas se presentan como los anexos 1 y 2, en los cuales puede observarse que las diferencias entre los programas son las siguientes:

a) La distribución de clases. En tanto que para la clave 1203 tiene asignadas 3 horas de teoría y 2 de problemas, asignándole 8 créditos, la clave 1232 tiene asignadas 4 horas de teoría y dos de discusión, asignándole por lo tanto 10 créditos.

b) Los contenidos temáticos difieren en que: En la clave 1203 se incluyen la Ley de Gauss y Las Ecuaciones de Maxwell, que se omiten en la clave 1232. Los temas “Circuitos de corriente alterna” y “Aplicaciones”, aparecen en la clave 1232 pero no en la clave 1203. Es decir, las diferencias son mínimas, sin embargo, la bibliografía que se recomienda para clave 1203 es:

Kelvey, J. y Grateh. H. Física para ciencias e ingeniería, Vol. II. Harla. 1981.

Weidner & Sells. Elementary Classical Physics. Vol. II. Allyn and Bacon. (no se indica edición ni país)

Resnick & Halliday. Physics For Students of Science and Engineering . Vol. II. Wiley Topan.(no se indica edición ni país)

Feynman. Lectures on Physics. Vol. II. Addison-Wesley. (no se indica edición ni país)

En tanto que, para la clave 1232 se recomienda la bibliografía:

Alonso, M. Y Rojo, O., Física. Tomo II, Campos y Ondas. Fondo Educativo Interamericano S.A. México. 1981.

Si bien, los contenidos de los programas son prácticamente los mismos así como las horas semanales asignadas a cada curso, es notable la diferencia en el nivel cognoscitivo que se sugiere pues el libro recomendado como texto para la clave 1232, se considera un libro adecuado para el nivel bachillerato y no para licenciatura. Lo anterior carecería de importancia si los cursos se impartieran independientes uno del otro, pero en la práctica, los grupos se integran con estudiantes de todas las carreras.

El H. Consejo Técnico de la Facultad de Química, con fecha 15 de febrero de 1990, autorizó la "modificación provisional" de los programas sobre electromagnetismo, con las claves 1203 y 1232 en la forma que se presenta como anexo 1 y que es la que se imparte actualmente.

Independientemente del número de créditos asignados a cada programa, en la actualidad, se imparten 5 horas de teoría y dos de laboratorio por cada semana.

Generalmente no existe coordinación o acuerdo entre los profesores de teoría y los de laboratorio, debido primordialmente a que, para inscribirse, los estudiantes escogen tanto al profesor de teoría como al de laboratorio y dado que los grupos de teoría pueden estar constituidos hasta por 55 estudiantes y los de laboratorio tienen un cupo máximo de 15 estudiantes, los alumnos pertenecientes a un grupo de teoría podrían estar (en el mejor de los casos), en tres diferentes grupos de laboratorio.

Los contenidos temáticos del curso experimental, para el cual no existe un programa oficial, son los que se enlistan en el anexo 2 y surgen del consenso entre los profesores de la Sección de Física Experimental.

Para el logro de los objetivos del curso experimental, en cada grupo se realiza un conjunto de "experimentos" que el profesor selecciona (a su libre albedrío) de un manual de prácticas cuyo uso es optativo, o las prácticas que el profesor juzgue convenientes. Este procedimiento da por resultado que el número de prácticas que cada grupo realiza, es variable y puede darse el caso en que los temas vistos sean diferentes para cada grupo de laboratorio.

Para asentar las calificaciones obtenidas por los estudiantes en las actas oficiales, el procedimiento es el siguiente:

a) Los profesores de laboratorio entregan los resultados de los grupos a su cargo, a la coordinación de física experimental, la cual procede a hacer llegar oportunamente dichos resultados, a los profesores de teoría.

b) El profesor de teoría asienta las calificaciones para lo cual ha de ponderar, con base en los créditos correspondientes para cada actividad, los resultados obtenidos en el laboratorio y en la clase de teoría.

c) Los resultados obtenidos en la teoría y en el laboratorio sólo pueden ser promediados en el caso en que ambos sean aprobatorios (calificación mayor o igual a seis).

d) En el caso en que el estudiante apruebe el laboratorio y no apruebe la teoría, la calificación del laboratorio es definitiva y con posterioridad será enviada al profesor con el que el estudiante recurre la asignatura (o al jurado en el caso de exámenes extraordinarios).

Los resultados que históricamente se han obtenido, son similares a los que se presentan en la tabla 5.1 que aparece en la página 70.

Las asignaturas "Electromagnetismo" de la Facultad de Química y de la Facultad de Ciencias, son equivalentes en cuanto a su contenido, nivel cognoscitivo y objetivos que pretenden. La asignatura "Electrodinámica", de la Facultad de Ciencias, es de un nivel superior a las otras dos consideradas.

Los índices de reprobación para las tres asignaturas consideradas son 39% en la asignatura electromagnetismo, que se imparte en la Facultad de Química, 52% para la asignatura "Electromagnetismo" que se imparte en la Facultad de Ciencias y 56% para la asignatura "Electrodinámica" que también se imparte en la Facultad de Ciencias¹⁶⁵.

Los valores de los índices de reprobación de las asignaturas, justifican sobradamente cualquier esfuerzo que se haga para reducirlos.

e) Método seguido para el desarrollo de la propuesta de enseñanza

Este trabajo, consiste en una investigación educativa en la que se analizaron las acciones humanas y las situaciones sociales experimentadas por el profesor, con el claro propósito de profundizar en la comprensión de las situaciones problemáticas y dado que la forma de reflexión que se usó fue la que está relacionada con el diagnóstico y no con la respuesta o con la elección, de manera clara podemos identificar el método seguido con el que Elliott¹⁶⁶ ha denominado "Investigación-acción", de las acciones llevadas a cabo, para el desarrollo del curso, se destacan:

- ❖ Elaboración de los instrumentos para el análisis de la práctica.
- ❖ Determinación de las ideas previas de los estudiantes en torno a los conceptos fundamentales del electromagnetismo. (Campo electromagnético, potencial, carga eléctrica, corriente eléctrica y otros)
- ❖ Creación de zonas de desarrollo próximo e intervención en las mismas.
- ❖ Determinación de los elementos y las decisiones de evaluación.

¹⁶⁵ Los nombres oficiales de las asignaturas que denomino electromagnetismo y electrodinámica, que se imparten en la Facultad de Ciencias son Física Clásica IV y Física Teórica III, respectivamente.

¹⁶⁶ Elliott, J. *La Investigación-acción en educación*. Ediciones Morata. Madrid. 1997.

f) Acciones encaminadas a la construcción de la zona de desarrollo próximo.

Atendiendo únicamente al aspecto normativo, es decir, al programa de la asignatura "electromagnetismo", que se incluye como anexo 1, podríamos esperar que el grupo con el que se ensayó la propuesta de enseñanza contenida en esta tesis y que está integrado por estudiantes que están cursando, al menos, el segundo semestre de una licenciatura en química, poseyera las habilidades y destrezas intelectuales que a continuación se enumeran:

a) Habilidades de lecto-escritura correspondiente a una persona que posee el título de bachiller.

b) Conocimientos matemáticos sobre: álgebra de los números reales, geometría analítica euclidiana, cálculo diferencial integral de función de una variable, (los alumnos ya cursaron en la Facultad de Química las asignaturas "cálculo de función de una variable" y "álgebra")

c) Conocimientos básicos sobre física, particularmente mecánica clásica, puesto que ya cursaron en la Facultad de Química la asignatura "cinemática y dinámica".

d) Habilidad para construir e interpretar gráficas a partir de datos experimentales así como construir expresiones matemáticas a partir de las gráficas (los alumnos ya cursaron los laboratorios tanto de química general como de cinemática y dinámica en la Facultad de Química).

e) En virtud de haber cursado la asignatura "química general" se espera que tengan algunas concepciones contextualmente válidas, sobre la estructura atómica de la materia.

f) Precisamente por estar inscritos en carreras relacionadas con la química, resulta razonable suponer que los estudiantes poseen motivación intrínseca para conocer sobre las teorías científicas que son sustento de su campo de estudio.

Para indagar sobre la validez de estos supuestos y con el objetivo de estructurar una estrategia didáctica adecuada, se realizaron las siguientes acciones:

1.- Aplicación de dos exámenes diagnóstico, uno referido a los conocimientos mínimos considerados como requisitos para cursar la asignatura y el otro, para corroborar la comprensión de lectura de los estudiantes.

2.- Interrogatorio escrito sobre las condiciones socioeconómicas de los estudiantes.

3.- Búsqueda sobre la motivación intrínseca para el aprendizaje de la teoría electromagnética por parte de los alumnos.

4.- Búsqueda de algunas preconcepciones relacionadas con el electromagnetismo, en los estudiantes del curso.

A continuación, se reseñan los resultados obtenidos en cada una de estas acciones:

Sobre los exámenes diagnóstico.

El examen sobre conocimientos básicos, trató sobre los temas:

- ✓ Aritmética
- ✓ Sistemas de Unidades
- ✓ Cantidades relativas (cálculo de %)
- ✓ Análisis gráfico.
- ✓ Mecánica Clásica.
- ✓ Cálculo Diferencial Integral (función de una variable)

El contenido del examen diagnóstico, se incluye a continuación (Sólo se anotan las preguntas y no las opciones de respuesta, que para efectos de este trabajo, carecen de importancia). Contiene 30 reactivos de opción múltiple (5 opciones), se les permitió usar calculadora de bolsillo y el tiempo de aplicación fue de 2 horas y 30 minutos, los reactivos, (5 para cada tema), son los siguientes:

1. El triple de la suma de dos números es 1350 y el doble de su diferencia es 700. Hallar los números
2. Un mechero de alcohol consume $\frac{3}{4}$ litro por cada día. ¿Cuánto consumirá en $\frac{5}{6}$ de día?
3. El obrero A descarga un camión en 6.0 hora y el obrero B lo hace en 7.0 hora ¿En cuánto tiempo descargan entre los dos un camión?
4. Se compran 14.0 kg de mercancías por \$ 64.00 ¿A qué precio hay que vender el hg para ganar \$ 20.00?
5. Un caracol sube desde el fondo de un pozo que tiene 10.0 m de profundidad. Si cada hora sube 3.0 m y en la siguiente hora se resbala hacia abajo 1.0 m. ¿En cuántas horas sale del pozo?
6. Las ruedas delanteras de un automóvil tienen una circunferencia de 1.0 m más 80.0 cm y la circunferencia de las ruedas traseras es de 2.0 m más 60.0 cm. Cuando el automóvil haya recorrido una distancia de 1.0 km más 1.0 hm más 70.0 m ¿Cuántas vueltas habrán dado las ruedas delanteras y cuántas las traseras?
7. Entre otras combinaciones, la energía puede medirse en:
8. De las ternas que se presentan ¿cuál está constituida por unidades del S.I.?
9. La densidad relativa surge del cociente de las densidades absolutas de dos sustancias (por lo general una de ellas es el agua). Por lo tanto, las unidades de medida de la densidad relativa son:
10. En el Sistema Británico de Ingeniería ¿Cuál es la unidad de masa?
11. ¿Cuál es el precio de un par de zapatos por el que pagó \$ 150.00 después de haberle deducido el 15.0% de descuento?
12. Se emplea un péndulo simple para estimar el valor de la aceleración de la gravedad. Se sabe que el

péndulo simple obedece la ecuación $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$ donde T es el periodo, l la longitud y g la

aceleración de la gravedad. Si T se mide con incertidumbre del 2.0% y l se mide con incertidumbre de 1.5% ¿Cuál es la incertidumbre asociada con una medida de g?

13. Juan gana \$ 900.00 pesos semanales y le aumentaron el sueldo a \$1080.00 Pedro gana \$75.00 diarios y le aumentaron el sueldo a \$ 97.50 diario ¿Quién recibió un aumento mayor?
14. Si contratamos un préstamo de \$ 100.00 con interés compuesto del 1.5% diario ¿Cuánto debemos pagar al término de 5 días?
15. En una mezcla hay 250.0 g de sal y 450.0 g de azúcar ¿Qué tanto por ciento de sal hay en la mezcla?
16. Si al unir los puntos experimentales en el plano xy en una gráfica, se obtiene una curva y al graficar y/x como función de $\log x$ se obtiene una recta, la expresión matemática que representa a esa recta es:
17. En una gráfica de magnitud de velocidad como función del tiempo ¿Qué representa el área acotada entre la curva y el eje del tiempo?
18. Si se tiene la ecuación $x = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$ donde x representa la posición de una partícula, v_0 es la velocidad inicial, a es la aceleración y t representa al tiempo, al trazar una gráfica de x como función del tiempo, se obtiene una curva. ¿Cuáles serán las coordenadas una vez que se hagan los cambios de variables correspondientes para que al trazar una gráfica obtengamos una recta?

19. La ecuación de la recta que se muestra en la figura 1 es:
20. Las rectas $y_1 = 3x + 8$; $y_2 = 3x - 8$ son:
21. Una partícula se mueve en el plano xy de modo que sus coordenadas x e y varían con el tiempo según las expresiones: $x(t) = t^3 - 32t$; $y(t) = 5t^2 + 12$ La velocidad de la partícula queda entonces descrita por:
22. Un cuerpo se mueve con velocidad constante de 10.0 m/s durante 10.0 s. Repentinamente aumenta su velocidad a 20.0 m/s ¿Cuánto tarda en recorrer 20.0 m?
23. Para que dos fuerzas que actúan sobre un mismo punto, tengan la mayor resultante posible, basta con que:
24. Dos móviles parten simultáneamente del mismo punto. El primero se mueve hacia el norte con velocidad constante de 3.0 m/s y el segundo se mueve hacia el oriente con velocidad de 4.0 m/s ¿A qué distancia se encuentran uno del otro al cabo de 10.0 s?
25. Un cuerpo de masa 5.0 kg tiene energía cinética igual a 90.0 J, por lo tanto, la magnitud de su velocidad es igual a:
26. La función $X_0 + V_0 t + \frac{1}{2} a t^2$ tiene su valor mínimo cuando:
27. De la parejas de valores que se proporcionan, indique las que representan el máximo y el punto de inflexión de la función $y = X e^{-3X}$
28. La velocidad v de un paracaidista está dada por la expresión $V = \left(\frac{mg}{k}\right)(1 - e^{-kt/m})$ donde t es el tiempo, m la masa del paracaidista, g es la aceleración de la gravedad (considerada constante) y k una constante positiva. Calcule $\lim_{t \rightarrow \infty} V$
29. Un recipiente cilíndrico de radio 5.0 pie y altura 8.0 pie contiene $\frac{3}{4}$ de su volumen lleno de agua, cuya densidad es 62.4 lb/pie³. El trabajo requerido para desalojar esa agua, mediante una bomba está representado por $W = \int_0^6 (8 - x)(62.4)(5^2 \pi) dx$ por lo que el trabajo W expresado en lb.pie es:
30. Con una lámina rectangular de 4.0 pie por 5.0 pie, se construye una caja cortando esquinas cuadradas (ver figura). El volumen que dicha caja puede alojar está dado por la expresión $V(x) = 4x^3 - 18x^2 + 20x$ donde x está restringida al intervalo cerrado $[0, 2]$ pulgada. Así que el volumen promedio de las cajas con respecto al corte x es $V = \frac{1}{2-0} \int_0^2 (4x^3 - 18x^2 + 20x) dx =$

Sobre la comprensión de lectura

Adicional al examen anterior, en otra sesión, se llevó a efecto la aplicación de una experiencia que midiera, al menos de manera burda, la comprensión de lectura de los estudiantes y para ello se proyectó, en una pantalla, en el aula, el siguiente párrafo:

"LA BUENA CONCIENCIA

En el centro de la selva existió hace mucho una extravagante familia de plantas carnívoras que, con el paso del tiempo, llegaron a adquirir conciencia de su extraña costumbre, principalmente por las constantes murmuraciones que el buen Céforo les traía de todos los rumbos de la ciudad.

Sensibles a la crítica, poco a poco fueron cobrando repugnancia de la carne, hasta que llegó el momento en que no sólo la repudiaron en el sentido figurado, o sea el sexual, sino que por último se negaron a comerla, asqueados a tal grado que su simple vista les producía náuseas.

Entonces decidieron volverse vegetarianas.

A partir de ese día se comen únicamente unas a otras y viven tranquilas, olvidadas de su infame pasado.

Augusto Monterroso."

La proyección se mantuvo por cinco minutos, se hizo una pausa de dos minutos y se volvió a proyectar durante cinco minutos más, al cabo de los cuales los estudiantes dieron respuesta, por escrito, a las siguientes preguntas:

- 1) ¿Qué papel juega en la fábula el buen Céfiro?
- 2) ¿Qué comen actualmente las plantas carnívoras de la fábula?
- 3) ¿Por qué adquirieron conciencia las plantas carnívoras de la fábula?
- 4) ¿A qué son sensibles las plantas carnívoras de la fábula?
- 5) ¿Qué olvidaron las plantas carnívoras de la fábula?

Los resultados numéricos obtenidos en los dos exámenes diagnóstico, se presentan a continuación.

Cuadro 5.2

	Clave	A	U	%	G	M	C	Total/30	CL
1	JAL	4	2	3	1	1	0	11	2
2	FAB	1	3	3	0	4	2	13	3
4	GAA	4	2	1	0	0	2	9	2
5	ABH	3	3	2	2	1	0	11	2
6	RCH	4	3	2	1	3	0	13	3
7	RCS	2	2	1	1	1	0	7	2
8	OCH	2	2	1	3	3	0	11	3
9	SCG	1	0	1	3	0	1	6	2
10	TCR	2	2	2	1	0	0	7	1
12	JCM	1	1	3	3	0	0	8	2
13	GCG	2	3	3	2	3	2	15	3
14	JCZ	2	3	1	1	0	0	7	2
15	JFM	2	2	1	0	3	0	8	3
16	AFP	3	3	2	2	0	0	10	3
17	LGH	3	3	3	3	4	0	16	4
18	SGG	5	2	2	2	1	0	12	3
19	LGM	4	5	4	2	2	1	17	4
21	RHM	2	2	4	2	4	0	14	2
22	EHT	0	0	2	3	1	0	6	3
23	DJP	1	3	0	0	1	0	5	3
24	HJA	1	3	1	2	0	1	8	2
25	JJV	2	2	3	1	0	0	8	2
26	ALL	5	2	3	3	3	1	17	3
27	KLA	2	2	4	2	4	3	17	4
28	VLV	4	2	1	3	4	0	14	4
29	AMP	4	1	1	3	0	1	10	3
31	CMM	4	3	3	2	3	3	18	3
32	EMB	4	0	4	1	1	0	10	3
33	MMM	3	3	2	2	0	0	10	3
34	AOC	2	2	3	1	0	0	8	2
35	MOG	3	3	1	1	0	0	8	3
36	COR	5	2	3	1	1	3	15	4
37	LRG	2	3	1	1	0	0	7	1
38	IRS	1	3	4	1	2	1	12	3
39	GRT	1	2	4	1	2	2	12	3
40	JSR	2	2	1	1	0	0	6	1
41	ASF	3	3	1	1	0	0	8	2
42	HVR	3	3	4	0	0	2	12	4
43	IVO	3	3	1	1	4	2	14	5
44	MVL	3	3	4	3	0	0	13	4
Promedios.		2.6	2.3	2.2	1.6	1.4	0.7	10.7	2.8

Cuadro 5.2. Muestra los resultados obtenidos por los estudiantes del grupo 08 de la asignatura Electromagnetismo, correspondientes a los exámenes diagnóstico sobre conocimientos básicos de física y matemáticas considerados como requisitos indispensables para cursar la asignatura, así como los resultados del examen sobre comprensión de lectura.

Los encabezados del cuadro, tienen el siguiente significado:

Clave = Iniciales de los nombres de los estudiantes.

A = Aritmética

U = Sistemas de unidades

% = Cantidades relativas

G = Análisis gráfico

M = Mecánica

C = Cálculo diferencial Integral

CL = Comprensión de lectura.

Como se explicó antes, sobre cada tema se hicieron 5 preguntas, de manera tal que la calificación máxima posible era 30 aciertos para el examen diagnóstico y 5 aciertos para el examen sobre comprensión de lectura.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Con base exclusivamente, en los resultados numéricos obtenidos, podemos notar que los alumnos del grupo, en un porcentaje elevado, escasamente poseen las habilidades y destrezas mínimas necesarias para cursar exitosamente la asignatura, aun muestran deficiencias en comprender lo que leen, su capacidad de análisis y de síntesis es muy limitada y su manejo tanto de la matemática como de la física, que son herramientas indispensables en su campo de conocimientos, es pobre y defectuoso. Esta circunstancia guía al profesor a modificar los tiempos asignados en el programa oficial, a diseñar estrategias didácticas adecuadas al nivel cognoscitivo del grupo, a diseñar apoyos didácticos, etcétera.

Sobre el entorno socio-económico de los estudiantes.

Se recabó de los estudiantes una "historia de vida" y se les pidió contestar un cuestionario y, a partir de estos datos se pudo ubicar de manera burda, el entorno socioeconómico y su situación escolar, encontrándose la siguiente información:

<u>Composición por género:</u>	%
27 hombres	61
17 mujeres	39

Inscripción al curso:

23 por primera vez	52
21 por segunda vez	48
42 En la carrera que solicitaron	95
2 En carrera no solicitada	5

Distribución por carrera:

2 Química	5
10 Química de Alimentos	23
2 Ingeniería Química Metalúrgica.	5
12 Ingeniería Química	27
18 Química Fármaco-Biológica	41

Distribución de las edades

Edad/años	Num.	%
19	5	11
20	16	36
21	15	34
22	6	14
23	2	5

Hermanos

Num Hermanos	Num Estudiantes	%
0	2	5
1	8	18
2	17	39
3	15	34
más de 3	2	5

Tiempo promedio en desplazarse hacia la UNAM:

Horas	Num Estudiantes	%
0.5 a 1.0	2	5
1.0 a 1.5	21	48
1.5 a 2.0	17	39
Más de 2.0	4	9

Escolaridad de los padres:

Nivel	Papá	%	Mamá	%
Prim. incompleta	2	5	4	9
Primaria	8	18	10	23
Secundaria	10	23	15	34
Bachillerato	15	34	5	11
Licenciatura	8	18	7	16
Posgrado	1	2	3	7

Cociente del ingreso familiar, en salarios mínimos, entre el número de miembros:

Cociente	Núm	%
Menor que 1	20	45
1.0 a 1.5	13	30
1.5 a 2.0	8	18
mayor que 2	3	7

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Ninguno de los datos mostrados en el cuadro anterior, difiere significativamente de los que informa la Facultad de Química¹⁶⁷, para toda una generación de estudiantes, por lo que podemos ubicar al grupo 08 con el que se ensayó la propuesta, como un grupo típico de la Facultad de Química de la UNAM.

Sobre la motivación intrínseca

Conociendo someramente la situación socioeconómica de los estudiantes y una vez averiguados algunos datos relevantes de sus capacidades y destrezas intelectuales, era indispensable, para la obtención de buenos resultados, averiguar sobre la motivación intrínseca de los estudiantes del grupo, para aprender la teoría electromagnética. Para el efecto se procedió de la siguiente manera:

La experiencia ha demostrado, que el estudiante típico de la Facultad de Química, muestra resistencia a participar activamente en el desarrollo del curso, por lo general limita sus intervenciones en clase, a realizar reiteradamente las preguntas: ¿para qué me sirve?, ¿tiene alguna utilidad práctica?, ¿dónde se aplica?, etcétera. Como en esta propuesta didáctica, es indispensable que el estudiante se haga responsable de su propia formación, se desarrolló una sesión en la que el objetivo era indagar ¿cuál era (es) la percepción que se tenía con respecto a la utilidad del curso sobre electromagnetismo?, ¿Es necesario, para poder aprender química, el conocer la teoría electromagnética?. En el ejercicio de los profesionales de la química ¿tiene alguna utilidad saber teoría electromagnética?, ¿qué factores tomaron en consideración los estudiantes, para elegir los profesores de electromagnetismo?

Las participaciones de los estudiantes, en forma casi unánime evidenciaron que sólo los impulsaba a inscribirse en la asignatura el hecho de que *"aparece en el plan de estudios"*, creen que *"posiblemente tenga una utilidad más adelante y por eso la incluyeron en el plan de estudios"*. Exceptuando a muy pocos estudiantes, el grupo no consideraba necesario conocer la teoría electromagnética para comprender la química; en sus propias palabras, *"Electricidad pertenece a Física y no a Química"*. Con respecto a su elección de profesores en el curso de electromagnetismo, tanto de teoría como de laboratorio, sólo consideraron dos aspectos: el horario en que se impartía la asignatura y la concepción estudiantil sobre si el maestro es *"exigente"* o *"barco"*¹⁶⁸, inclinándose, la mayoría de los alumnos, por los profesores considerados como *"barco"*.

Para contribuir a despertar el interés de los estudiantes en la teoría electromagnética, se les asignó una investigación bibliográfica en la cual indagaran sobre las actividades que realizan los profesionales de la química, cada uno centrado en la carrera en la que estaba inscrito.

Los informes de los estudiantes, invariablemente mencionaron que, los profesionales de la química, entre otras muchas actividades, tienen a su cargo la realización de análisis químicos cuantitativos y/o cualitativos, mismos que se auxilian de las técnicas conocidas como:

- ❖ Espectrometría de masas.
- ❖ Espectrofotometría.

¹⁶⁷ Situación socioeconómica de los estudiantes de la Facultad de Química generación 2000.

¹⁶⁸ Un maestro "barco", es el que aprueba a todos los estudiantes inscritos en su curso, independientemente del desempeño que tengan.

- ❖ Análisis por radiación ultravioleta.
- ❖ Análisis por radiación infraroja.
- ❖ Resonancia magnética.
- ❖ Microscopía óptica.
- ❖ Microscopía electrónica.
- ❖ Cromatografía.

La discusión de estos informes evidenció que, gran parte de las técnicas que emplean los profesionales de la Química están relacionadas íntimamente con la teoría electromagnética y hubo, un cambio notable en cuanto a la percepción con respecto a la utilidad y la importancia del curso sobre electromagnetismo.

Identificación de algunos preconceptos relevantes para el diseño del curso sobre electromagnetismo.

La presentación del curso sobre electromagnetismo y su desarrollo posterior, depende de manera significativa de las habilidades intelectuales de los estudiantes inscritos en el curso, de sus concepciones alternativas, actitudes, aptitudes, etcétera. Por ello, con intención de conocer estos aspectos, se planteó a los estudiantes un problema simple, que a continuación se inserta y cuyos objetivos principales fueron:

- Conocer algunos preconceptos comunes de los estudiantes sobre “modelo atómico” y “carga eléctrica”
- Indagar sobre las concepciones de los estudiantes en relación a las “formas de interacción física”.
- Averiguar sobre las capacidades de los estudiantes para transferir el conocimiento (particularmente, conceptos de mecánica newtoniana al ámbito del electromagnetismo).

Problema: Dos gramos de bromuro de sodio se hacen reaccionar con un exceso de gas cloro, en caliente. ¿cuántos gramos de cloruro de sodio se obtienen como producto de la reacción?”

Primero se discutió la posibilidad de ocurrencia de la reacción química, lo que llevó al grupo, a considerar el concepto “desplazamiento químico”, que los estudiantes expresaron mediante frases como “el cloro desplaza al bromo”, la explicación que dieron los estudiantes al ser interrogados acerca de ¿por qué ocurre? es que “el cloro desplaza al bromo porque es más electronegativo”, al indagar al respecto, explicaron que la electronegatividad “es la capacidad que tienen los átomos para atraer a los electrones”, al preguntar ¿en qué unidades se mide esa capacidad? La respuesta fue “que existe una avidez del átomo”, “que existe una afinidad para atraer a los electrones”. Ahondando al respecto se les preguntó ¿cómo pueden ser medidas la avidez o la afinidad?. Desde luego, los estudiantes no pudieron dar respuestas a estas preguntas que fueron hechas sólo con la intención de provocar debate. Al intentar explicar con mayor claridad el significado del concepto “electronegatividad”, abundaron indicando que: “existe una tabla de uso común para los químicos” en donde aparecen todos los elementos en orden descendente de electronegatividad y la regla a seguir es que: “los elementos de arriba, desplazan a los de abajo”.

La información documental que obtuvimos, de los libros que en ese momento estaban en el aula, es la siguiente: “...Cuantitativamente, se puede valorar esta propiedad a partir del potencial de ionización y de la afinidad electrónica de los átomos individuales...”, “..... Midiendo los momentos dipolares, la energía necesaria para romper los enlaces y otras propiedades de las moléculas, es posible ordenar los elementos según su tendencia a atraer los electrones compartidos. Esta relación recibe el nombre de escala de electronegatividad¹⁶⁹.....”.

El grupo, en forma consensuada, llegó a las siguientes conclusiones:

a) Desconocemos por qué un elemento desplaza a otro. La explicación de la electronegatividad es para nosotros “una regla a seguir”, es una regla que hemos aplicado sin reflexión alguna.

b) Para entender el concepto “electronegatividad”, sería indispensable que supiéramos qué son los momentos dipolares de las moléculas y cómo se miden.

c) Tampoco sabemos, en este momento, cómo calcular el potencial de ionización o la energía para romper los enlaces de las moléculas.

d) Posiblemente, según avance el curso sobre electromagnetismo, estos conceptos puedan ser aclarados.

Para continuar con la solución del problema, era necesario “balancear” la ecuación química, lo que los llevó a discutir los conceptos: mol, oxidación, reducción, valencia, intercambio electrónico, niveles de energía en el átomo, enlace covalente, polar, etcétera, la discusión de estos conceptos hizo evidente que los estudiantes, no poseen una representación (modelo) del átomo que resulte coherente y soporte al menos un análisis superficial. Las investigaciones llevadas a cabo por Thacker¹⁷⁰ muestran la conveniencia de que el estudiante desarrolle modelos microscópicos coherentes y consistentes para comprender a cabalidad los fenómenos electromagnéticos. Los estudiantes del grupo mencionaron la existencia de electrones, protones, neutrones, partículas alfa y algunas otras partículas subatómicas, de las cuales no tenían referentes que fueran más allá del nombre. De este modo, la estructura atómica que concebían, era, por lo general, un híbrido entre conceptos clásicos y conceptos cuánticos en el que aparecían: atracciones, repulsiones, cargas eléctricas, polos magnéticos, orbitales, niveles energéticos, potenciales, probabilidad de existencia, funciones de distribución, ecuaciones de onda, etcétera.

Haciendo un resumen de los resultados obtenidos al haber planteado el problema simple que nos ocupa, es de resaltarse lo siguiente:

- ❖ En el grupo de estudiantes hubo un intenso intercambio de significados.
- ❖ Hubo una “toma de conciencia” en los estudiantes, aceptaron que hasta el momento, habían tenido una actitud poco científica al actuar “siguiendo reglas de las que desconocían su origen y validez”
- ❖ Los estudiantes notaron que constantemente están haciendo referencia a “conceptos” que mencionan sin más referente que el nombre, fueron citados

¹⁶⁹ Sienko, M. Y Plane, R. *Química*. Aguilar. México. 1978.

¹⁷⁰ Thacker, B. y otros (1999) Obra citada.

particularmente los conceptos “electronegatividad”, “avidez”, “afinidad electrónica” y “nivel de energía”.

- ❖ El grupo de estudiantes llegó a la conclusión de que, “en tanto no se tuviera una concepción clara de un modelo atómico, muchos de los conceptos mencionados, carecían también de significado”
- ❖ Quedó establecida la necesidad de construir colectivamente un modelo atómico que fuera coherente con los conceptos químicos y físicos que los estudiantes de química manejan cotidianamente.

Procedimos a construir el modelo atómico que se cita en el párrafo anterior. Desde luego, los estudiantes tenían referencias de modelos atómicos construidos en el pasado: Thompson, Bohr, Sommerfeld, etcétera, pero ahora quedaba claro que era imperativo comprender el concepto “carga eléctrica” puesto que estos modelos mencionan relaciones entre cargas.

La indagación, mediante interrogatorio directo y abierto a los estudiantes del grupo, mostró que, la carga eléctrica era concebida por la mayoría de ellos, en alguna de las siguientes formas:

- ❖ El electrón o el protón
- ❖ Una forma de energía
- ❖ Una sustancia física
- ❖ La fuerza que se ejerce sobre un campo
- ❖ La manera de intercambiar energía eléctrica
- ❖ Una propiedad característica de la materia
- ❖ La capacidad que tienen algunas sustancias de intercambiar energía eléctrica

Para facilitar el que los estudiantes construyeran el concepto “carga eléctrica”, se asignaron lecturas referentes a los trabajos realizados por Gilbert¹⁷¹, Franklin¹⁷² y Coulomb¹⁷³, se realizaron algunas experiencias de cátedra (frotar barras de vidrio o plástico con paños, cargar eléctricamente algunos objetos mediante un generador electrostático, reproducir con esferas cargadas, los experimentos cualitativos realizados por Franklin), etcétera.

Se discutieron en clase, las lecturas, las experiencias de cátedra y se analizaron las diversas concepciones sobre la carga eléctrica, hasta lograr el siguiente concepto consensuado:

“La carga eléctrica es una manifestación de la materia que se hace evidente cuando un cuerpo, después de haber sido frotado, es capaz de atraer trozos pequeños de otros cuerpos (como papel, paja, etc.)”

Resulta claro, que para lograr esta construcción, nos apoyamos significativamente en los aportes de la historia del electromagnetismo.

Con la construcción colectiva del concepto “carga eléctrica”, pudimos hacer una primera aproximación a nuestro modelo atómico, sin embargo, el no tener clara la forma de interacción entre las

¹⁷¹ Gilbert, W. (1958) Obra citada.

¹⁷² Mason, E. *A History of the Sciences*. Abelard-Shuman. USA. 1962.

¹⁷³ Shamos, M. (1959) Obra citada

cargas eléctricas era todavía un impedimento, por ello se procedió a analizar el fenómeno de interacción eléctrica entre cargas.

Recurrimos nuevamente a revisar lecturas referentes a los experimentos de Franklin¹⁷⁴ y Colulomb¹⁷⁵ pero en esta ocasión, nuestro objetivo principal era comprender la interacción entre partículas cargadas eléctricamente.

El análisis y la discusión del experimento realizado por Coulomb, puso de manifiesto que, la mayoría de los alumnos, también tenían dificultades, para concebir adecuadamente los conceptos:

- ✓ Partícula
- ✓ Homogeneidad dimensional
- ✓ Proporcionalidad directa e inversa

Estas dificultades ya estaban consideradas, dados los resultados del examen diagnóstico, sin embargo, es importante mencionar que los estudiantes del grupo, aun cuando habían tomado uno o dos cursos elementales de física (en el ciclo de bachillerato) y también habían cursado la asignatura "Cinemática y Dinámica", en la Facultad de Química, en general, fueron incapaces de mencionar las leyes de Newton de la mecánica y consecuentemente, la comprensión de dichas leyes era pobre y confusa, situación que explica detalladamente Andrés¹⁷⁶, quien al investigar el comportamiento diferenciado entre estudiantes que han cursado física y los que no, encuentra que quienes ya cursaron física, en el mejor de los casos, adquieren algunas destrezas para usar algoritmos en la solución de algunos problemas simples. Por lo que a esta propuesta compete, era de fundamental importancia que los estudiantes tuvieran un entendimiento aceptable de las leyes de Newton de la mecánica, puesto que nuestro desarrollo de la teoría de campos, se fundamenta en las ideas de Michael Faraday, cuyos postulados eran, diferentes a los de Newton. El paradigma dominante en la época en que Faraday publicó sus trabajos, era la teoría fisico-filosófica de Newton y todas (o la mayoría) de las discusiones acerca de la validez de los trabajos de Faraday (que es el referente teórico que toma Maxwell para establecer la teoría electromagnética), se dieron en torno a si cumplían o contravenían los postulados newtonianos.

Para mejorar la comprensión de las leyes de Newton, se hicieron exposiciones, se asignaron y se discutieron en clase algunas lecturas, se asignaron ejercicios algunos de ellos para ser resueltos en forma individual y otros por equipos, discutiéndose los resultados en clase.

El desarrollo de estas actividades, permitió la interpretación adecuada de las Leyes de Newton y, consecuentemente la de Coulomb, que se refiere a la interacción entre partículas puntuales cargadas.

Se comprobó la comprensión de la Ley de Coulomb mediante la solución de algunos ejercicios en clase, la mayoría de los estudiantes podía responder preguntas del tipo:

¿Qué magnitud tendrá la fuerza...?

¹⁷⁴ Conant, J. (editor) *The development of the concept of electric charge*, Harvard case histories in experimental science. Cambridge : Harvard University, 1957.

¹⁷⁵ Shamos, M. (1959). Obra citada.

¹⁷⁶ Andrés, M. (1990). *Evaluación de un plan instruccional dirigido hacia la evolución de las concepciones de los estudiantes acerca de circuitos eléctricos*. Enseñanza de las Ciencias 8(3), 231-237.

¿En qué dirección se moverá la carga si...?

¿Se logrará una condición de equilibrio estable si....?, etcétera.

Cuando se consideró que el grupo había logrado una construcción colectiva del concepto “carga eléctrica” así como de la forma en que las partículas puntuales cargadas interactúan entre sí, y tomando en consideración las ideas previas de los estudiantes con respecto a los “modelos atómicos”, procedimos a construir nuestro modelo, buscando casi de manera exclusiva que fuera útil para entender las ideas sobre electromagnetismo. El modelo en cuestión no es otro que el modelo clásico de Rutherford, para el átomo de hidrógeno, adicionado con dos postulados de Bohr, el primero que establece que los electrones giran en órbitas circulares alrededor del núcleo, bajo la acción de fuerzas coulombianas y el segundo, que establece la cuantización del momento angular. Así, se tenía un átomo constituido exclusivamente por protones, neutrones y electrones que se encuentran en el espacio vacío, entre los cuales pueden existir interacciones coulombianas, (las interacciones nucleares sólo se mencionaron para hacer coherente el modelo).

Sobre la secuencia seguida en el desarrollo del curso

En este momento del curso, contábamos con los elementos necesarios para iniciar el desarrollo medular del programa; contábamos con: un panorama general sobre las concepciones alternativas de los estudiantes en torno a los conceptos fundamentales del electromagnetismo, los resultados de los exámenes diagnóstico, mismos que nos permitían ubicar con claridad aceptable sus destrezas intelectuales referidas a matemáticas y física, una aproximación burda sobre su situación socioeconómica y, adicionalmente habíamos realizado las construcciones colectivas de “carga eléctrica” e “interacción entre cargas puntuales” por lo que se consideró adecuado plantear el curso sobre electromagnetismo atendiendo a los siguientes aspectos:

- ❖ Hacer evidente la necesidad de conocer la teoría electromagnética, para poder entender los principios químicos.
- ❖ Inducir la participación del grupo de estudiantes en el análisis (superficial por el momento) de las técnicas más comunes empleadas por los profesionales de la química, haciendo énfasis en la relación estrecha que guardan dichas técnicas con la teoría electromagnética

Tomando estos datos en consideración, se hizo la presentación de la teoría de Maxwell, atendiendo a la metodología que se indicó en las páginas 88 a 90 de este escrito.

El desarrollo del curso, fue mostrando poco avance en el aprendizaje de los estudiantes, muy posiblemente originado por la dificultad de comprensión de algunos conceptos, que los profesores por lo general, consideramos simples y suponemos que forman parte de la estructura cognitiva del estudiante, por ejemplo, la frase “...el campo eléctrico se manifiesta en el espacio físico que rodea a una carga eléctrica...” puede, en algunos casos, carecer absolutamente de significado para un estudiante en virtud de que dicho estudiante puede tener preconcepciones erróneas con respecto a la carga y al campo, según lo demuestran en su investigación Colombo y Fontdevila¹⁷⁷.

¹⁷⁷ Colombo de Cudmani, L y Fontdevila, P. (1990). *Concepciones previas en el aprendizaje significativo del electromagnetismo*. Enseñanza de las Ciencias 8(3), 215-222

Independientemente al hecho de haber comprobado que los estudiantes comprendían la ley de Coulomb, se hicieron evidentes las dificultades matemáticas que impidieron a la mayoría de los estudiantes del grupo, el resolver problemas de orden práctico. (En esta etapa, los problemas fundamentales fueron: Álgebra de vectores, trigonometría plana y cálculo diferencial e integral de función de una variable). El manejo deficiente de las matemáticas no se intentó resolver de manera directa, se hicieron recomendaciones bibliográficas, se exhortó a los estudiantes a asistir a las asesorías personalizadas que tiene establecidas el Departamento de Matemáticas de la Facultad de Química y se procuró, durante el desarrollo del curso sobre teoría electromagnética, evitar hasta donde esto fuera posible, las explicaciones basadas exclusivamente en los resultados matemáticos, asimismo, cuando era indispensable hacer deducciones matemáticas, se procuraba que hubiera la mayor claridad posible.

El abordar el problema de establecer la forma de interacción entre partículas puntuales cargadas (esencialmente en reposo) que se encuentren a grandes distancias entre sí, evidenció a los estudiantes el problema sobre la posibilidad de ocurrencia de la “acción instantánea a distancia” que postuló Newton ya que en la actualidad se conoce la teoría de Einstein que postula que ninguna señal puede viajar con una rapidez mayor que la de la luz en el vacío. Los estudiantes plantearon la necesidad de establecer “otra teoría”, distinta a la de Newton que explicara los fenómenos eléctricos tomando en consideración que la acción no podía ser instantánea. Para que conocieran otro enfoque, se revisaron y discutieron las ideas de Michael Faraday¹⁷⁸ con respecto a su concepción del universo, esto les amplió el panorama de la teoría electromagnética, las ideas de Faraday resolvían el problema de la acción instantánea, aceptaron que las interacciones no tenían que ocurrir instantáneamente, pero como se esperaba, las ideas de Faraday acerca de que el universo sólo está constituido por fuerzas y no existen las partículas, generó un rechazo casi generalizado, que no pudieron explicar, pero que de manera clara se ubica en sus preconcepciones.

Nuevamente se abordaron las dos ecuaciones de Maxwell que habían sido expuestas prácticamente al inicio del curso. Se dieron las explicaciones procedentes y, desde luego, hubo la necesidad de ayudar a los estudiantes a construir el concepto de campo eléctrico.

Mediante interrogatorios directos, primero en el salón de clase durante el tratamiento del concepto campo eléctrico y tomando en consideración que, el concepto general de campo ya había sido presentado a los estudiantes en los cursos introductorios de física en el bachillerato y también durante el curso sobre cinemática y dinámica que se imparte en la Facultad de Química. También se realizaron entrevistas personales con los estudiantes a los que se les presentaba un hecho experimental que más adelante se describe. Algunas de las ideas previas de los estudiantes resultaron ser:

El campo eléctrico es:

- ❖ Una concentración de energía en el espacio.
- ❖ Un conjunto de fuerzas distribuidas en el espacio, que no permiten el paso de partículas.
- ❖ Una película invisible que no permite el intercambio de energía.
- ❖ Una cuadrícula de vectores fuerza que se opone a ser penetrada.

Las entrevistas personales se llevaron a cabo de la siguiente manera:

¹⁷⁸ Faraday, M. (1965) Obra citada

En el cubículo se tenía preparado un generador electrostático accionado por motor eléctrico, se contaba con unas esferas pequeñas (diámetro de 0.5 a 1.0 cm) de poliuretano, metalizadas y montadas en agujas de madera. Se contaba además con un peine de plástico y picadura de papel.

Si el estudiante tenía pelo (un porcentaje elevado está rapado) y éste estaba seco y libre de grasa, se le pedía que pasara el peine repetidamente por el pelo y a continuación se le pedía que acercara el peine a la picadura de papel. Como el peine atraía a pequeños pedazos de papel se le interrogaba.

La variante de la experiencia, para el caso de estudiantes sin pelo, era cargar eléctricamente una pequeña esfera metalizada mediante el generador electrostático. Las preguntas eran las mismas que en el caso anterior.

A continuación, se incluyen tres ejemplos de las entrevistas llevadas a cabo con los estudiantes.

Entrevista con TCR

E. ¿Por qué el peine atrae al papel?

TCR Porque el peine está cargado eléctricamente.

E. ¿Por qué tienes que acercar mucho el peine al papel?

TCR Porque la fuerza que hace el peine es muy chiquita.

E. ¿Cómo explicas que la fuerza sea chiquita?

TCR Porque el peine tiene poca carga y entonces el vector fuerza es chiquito.

E. Si acercas el peine a una esfera metalizada ¿la atrae?

TCR No porque la esfera es de metal y el metal no está cargado.

E. ¿El peine sólo atrae a los objetos cargados?

TCR. Sí,

E. Entonces ¿El papel estaba cargado?

TCR Yo creo que sí, está hecho de átomos y allí hay cargas.

E. ¿Crees que hay un campo eléctrico entre el peine y el papel?

TCR. Sí.

E. ¿Cómo es el campo?

TCR No lo sé, es una concentración de energía que está en el espacio.

E ¿Estaba el campo antes de frotar el peine?

TCR Sí, siempre está.

E. ¿Por qué entonces no se movía el papel cuando estaba cerca el peine?

TCR porque el campo sólo se manifiesta si nosotros frotamos las cosas y las cargamos.

E. si pongo mi mano entre el peine y el papel ¿qué pasa con el campo eléctrico?

TCR No lo deja pasar, los vectores fuerza chocan con su mano y no atraen al papel.

Entrevista con MMM.

E. ¿Por qué el peine atrae al papel?

MMM. Porque el peine está cargado.

E. ¿Por qué tienes que acercarlo mucho al peine?

MMM Porque sólo estando los cuerpos muy cercanos actúa la fuerza eléctrica.

E. ¿Quién o qué hace la fuerza eléctrica?

MMM. En este caso, el peine y el papel.

E. ¿Por qué se hacen fuerzas?

MMM. Porque están cargados.

E. ¿Cómo fueron cargados?

MMM. Al frotarlos.

E. Pero sólo frotamos al peine con tu pelo. ¿y el papel?

MMM. Seguro que antes lo frotaron.

E ¿Crees que hay un campo eléctrico entre el peine y el papel?

MMM. Sí.

E. ¿Cómo lo sabes?

MMM Porque se atraen, entonces hay fuerzas y si hay fuerzas, entonces hay campo.

E. ¿Cómo es el campo?

MMM Es una distribución de fuerzas que están en el espacio.

E. ¿Cómo están distribuidas esas fuerzas?

MMM No sé bien, pero deben estar todas paralelas.

E. si pongo mi mano entre el peine y el papel ¿qué pasa con el campo eléctrico?

MMM. Lo destruyes, porque las fuerzas están orientadas y al pasar la mano, las desorientas.

E. Si acercas el peine a una esfera metalizada ¿la atrae?

MMM. Depende, si la esfera está cargada sí, de lo contrario no.

Entrevista con CMM

E. ¿Por qué el peine atrae al papel?

CMM. Porque rodeando al peine hay un campo eléctrico.

E. ¿por qué hay ese campo eléctrico?

CMM. Rodeando a toda carga eléctrica hay un campo eléctrico.

E. El campo eléctrico actúa sobre cualquier objeto?

CMM. No, sólo afecta a los que están cargados eléctricamente

E. ¿y por qué el peine atrae al papel?, ¿está cargado?.

CMM. Si lo está, al acercar el peine se induce una carga eléctrica.

E. ¿Por qué tienes que acercar mucho el peine al papel?

CMM. Porque el campo es débil a distancias grandes y fuerte cuando las distancias son pequeñas.

E. ¿Cómo es el campo?

CMM. No sé, pero rodea a las cargas y se manifiesta como si en cada punto del espacio hubiera un vector fuerza.

E. Si acercas el peine a una esfera metalizada ¿la atrae?

CMM. Sí. El efecto es igual que con el papel sólo que a lo mejor no lo vemos porque la masa de la esfera es muy grande.

Como puede observarse, TCR tiene un lenguaje limitado, se refiere a la fuerza como “chiquita” en lugar de referirse a su intensidad o magnitud, identifica al campo eléctrico con “una energía” pero sólo con la palabra, no tiene un referente claro del concepto. A la carga eléctrica la identifica como “el electrón” o “el protón”. Su concepción de campo eléctrico es pobre y confusa, es “algo” que está presente pero sólo se manifiesta si frotamos o cargamos las cosas. Los vectores tienen una realidad física tal que les permite “chocar con las manos”. En resumen, las explicaciones que da son incoherentes.

MMM. Tiene claro el concepto de carga eléctrica, entiende la ley de Coulomb, pero su interpretación del campo eléctrico es confusa, está constituido por un conjunto de vectores fuerza “todos paralelos” y éstos tienen una naturaleza tal que si pasamos la mano, “se desorientan”. En virtud de que entiende la ley de Coulomb, pretende hacer una interpretación del campo eléctrico, desde esa concepción, sólo que debe suponer que, sin que él estuviera presente, el papel fue cargado previamente.

CMM ha entendido aceptablemente que el campo está en el espacio que rodea a las cargas, generaliza en función de este conocimiento, interpreta adecuadamente que el campo tiene una dependencia con la distancia a la fuente, sin embargo, es claro que no tiene una representación de la distribución vectorial.

Entrevistas similares fueron realizadas con cada uno de los estudiantes del grupo y, con base en sus respuestas, se logró ubicar a tres subgrupos de estudiantes que presentaban características similares, dichos conjuntos fueron:

Subgrupo 1.- El conjunto de 28 estudiantes cuyas explicaciones causales eran las menos elaboradas, desde los que no tenían, en absoluto, explicación alguna para los fenómenos presentados, hasta los que admitían (en forma exclusiva) la acción instantánea a distancia entre los cuerpos y que, de manera general, podemos ubicar con las siguientes características:

- ❖ No poseen explicaciones causales para la mayoría de las situaciones que les son presentadas.
- ❖ En los casos en que poseen explicaciones, estas son, científicamente incoherentes.
- ❖ Desconocen las propiedades de un campo físico.

Subgrupo 2.- Este conjunto de 11 estudiantes, posee un lenguaje más elaborado que el subgrupo 1. Las explicaciones causales a los fenómenos que les son presentados, muestran una mayor coherencia científica. Por lo general, cada uno de estos estudiantes:

- ❖ Intuye la existencia de los campos y la atribuye a “una fuente generadora”
- ❖ Tiene problemas para concebir la variación del campo con la distancia a la fuente.
- ❖ Considera que, para que el campo exista, es indispensable la existencia de un cuerpo de prueba.
- ❖ No concibe al campo, matemáticamente, como un espacio vectorial.

Subgrupo 3.- Que incluye a los 5 estudiantes con las concepciones correctas con respecto a los campos, aceptando que:

- ❖ El campo eléctrico se manifiesta en todos los puntos que rodean a una fuente generadora (carga eléctrica, en esta primera instancia).
- ❖ La existencia (manifestación) del campo, es independiente de una carga de prueba.
- ❖ Si se retira la carga eléctrica de su posición original, el campo que generaba, deja de existir en ese lugar.
- ❖ La intensidad de la fuerza de un campo, en un punto del espacio, es función de la distancia de dicho punto, a la fuente generadora del campo.
- ❖ El campo eléctrico, es un campo vectorial y por lo tanto:
 - a) Las acciones de campos generados simultáneamente en un punto, por más de una fuente, obedecen las leyes matemáticas de operaciones con vectores.
 - b) El campo eléctrico (o la fuerza) poseen una dirección.
- ❖ La interacción entre dos cuerpos cargados eléctricamente, ocurre con la "intermediación" del campo y no se realiza de forma instantánea.

A continuación se inserta un cuadro que muestra la distribución de los subgrupos en que se clasificaron a los estudiantes:

Cuadro 5.3

<u>SUB GRUPO 1</u>					
1	FAB	10	JCM	19	VMM
2	CAH	11	JCZ	20	EMB
3	GAA	12	JFM	21	MMM
4	ABH	13	AFP	22	AOC
5	RCS	14	SGG	23	MOG
6	OCH	15	PHA	24	LRG
7	SCG	16	EHT	25	JSR
8	TCR	17	DJP	26	ASF
9	KCH	18	JJV	27	HVR
				28	MVI
<u>SUB GRUPO 2</u>					
1	JAL	5	RHM	9	AMP
2	RCH	6	HJA	10	IRS
3	GCG	7	KLA	11	GRT
4	LGH	8	VLV		
<u>SUB GRUPO 3</u>					
1	LGM	3	CMM	5	IVO
2	ALL	4	COR		

Cuadro 5.3 en donde se muestran los tres subgrupos en los que los alumnos fueron clasificados en función de sus preconcepciones con respecto al concepto "campo eléctrico" y cuyas características se describen en la página 108

Concepciones similares son informadas en el trabajo que realiza Nardi¹⁷⁹, aun cuando sus investigaciones las lleva a cabo con estudiantes de enseñanza básica, sin embargo, es notable que las preconcepciones de los estudiantes universitarios, son prácticamente las mismas que las de los estudiantes de enseñanza básica, excepto por el lenguaje, que puede llegar a ser mucho más elaborado en el estudiante universitario.

Más cercano a nuestro estudio, está el que realizan Colombo y Fontdevila¹⁸⁰ con estudiantes universitarios, en busca de las preconcepciones. Los investigadores concluyen: "...Las dificultades en el aprendizaje del electromagnetismo, se ponen de manifiesto, principalmente, en los aspectos conceptuales de la disciplina; estas dificultades radican, con un peso relativo alto, en la estructuración de los contenidos, que generalmente, se inician con la electrostática, tomando como estructuras conceptuales de partida los conceptos de carga, campo y potencial, conceptos "simples" que son el resultado de abstracciones muy complejas y, por eso mismo, no parece adecuado considerarlos como de asimilación simple o no se puede dar por sentado que estén suficientemente próximos a la estructura cognitiva del estudiante como para permitir un aprendizaje significativo".

Dados los antecedentes encontrados, el concepto de campo hubo de ser abordado desde diferentes ángulos: desde la perspectiva histórica, en exposiciones de clase se comentaron y discutieron las concepciones de Newton y Faraday. La fundamentación matemática se hizo, estableciendo primero campos escalares y posteriormente campos vectoriales, de la siguiente manera:

1.- **Campo escalar.** En el salón de clases se estableció un sistema coordenado cartesiano (plano), de manera que cada estudiante quedaba localizado mediante coordenadas (xy). Se les pidió suponer que cada uno de ellos tenía en la mano un termómetro con el que podían medir la temperatura ambiente. En el pizarrón se escribió una tabla que mostraba que se podía establecer una relación matemática entre cada punto del plano y la temperatura en ese punto; a continuación se extrapoló el resultado, estableciendo un sistema coordenado cartesiano en tres dimensiones (xyz). Nuevamente se estableció en el pizarrón la correspondencia entre puntos del espacio y valores de temperatura. A esa asociación la denominamos "Campo de Temperaturas", evidentemente ese es un ejemplo de campos escalares.

2.- **Campo vectorial.** El concepto de "campo", generalmente, fue presentado a los estudiantes en los cursos elementales de física, en referencia al tema de gravitación o bien cuando se abordaba el principio de conservación de la energía mecánica, que a ese nivel, se refiere fundamentalmente a energía cinética y energía potencial gravitacional, esa circunstancia permitía la siguiente construcción:

El estudiante acepta y entiende que todo cuerpo que es colocado en las cercanías de la superficie terrestre es acelerado "hacia abajo" (es decir, hacia el piso), con una aceleración, que siempre han trabajado como constante, a la que por lo general denotan como "g". Dibujando en el pizarrón a la tierra como un esfera, se le van colocando diferentes partículas en diferentes puntos y se pide a los estudiante indicar mediante flechas, la magnitud y dirección de la aceleración que actúa sobre cada partícula. Es fácil hacer la demostración matemática de que la aceleración debida a la atracción gravitatoria, es variable (considerando sólo la variación debida a la distancia de separación

¹⁷⁹ Nardi, F. *Campo de Força: Subsídios Históricos e Psicogenéticos para a Construção do Ensino desse conceito*. Universidad de Sao Paulo. 1991.

¹⁸⁰ Colombo de Cudmani, L y Fontdevila, P. (1990). Obra citada

entre las partículas interactuantes). Con esta adición, los estudiantes pueden ahora dibujar flechas que, necesariamente se irán haciendo más pequeñas en tanto más se alejan de la esfera. Nuevamente se hace ver al estudiante que se ha establecido una relación matemática entre puntos del espacio euclidiano tridimensional y vectores (que ahora identificamos como fuerza por cada unidad de masa). Es decir, ha sido construido un campo vectorial. El campo gravitacional.

El establecer una analogía entre el campo gravitacional y el campo eléctrico, fue inmediato.

Mediante interrogatorio directo, se detectó que la concepción de campo eléctrico, por parte de los estudiantes, mejoró notablemente, sin embargo, se obtuvo un efecto no deseado debido a que se hizo énfasis en las concepciones de Faraday, particularmente en el concepto *líneas de fuerza*, sobre el que también abundan en los textos usados a este nivel, como por ejemplo, Resnick¹⁸¹, Tipler¹⁸² o Giancoli¹⁸³. En el estudiante típico, queda una tendencia a confundir los vectores de campo eléctrico, con las líneas de fuerza de Faraday. Para corregir este aspecto, se resolvieron ejercicios simples en el salón de clases y para cada caso, se esbozaban las distribuciones de líneas de fuerza y a la vez, se identificaban los vectores de campo en algunos puntos. Este procedimiento simple, llevó a los estudiantes a interpretar que las líneas de fuerza de Faraday son “una representación” que hizo el investigador, que su naturaleza no quedó especificada claramente pero, que guía a la comprensión del fenómeno, en tanto que el vector campo eléctrico, tiene una “realidad física”, es una propiedad que podemos medir.

Para reforzar el concepto “Campo Eléctrico” se plantearon y resolvieron en el salón de clases, ejercicios encaminados a establecer:

- ❖ Dada una distribución discreta de carga ¿Cuál es el campo eléctrico producido en un punto del espacio?
- ❖ Dada una distribución continua de carga ¿Cuál es el campo eléctrico producido en un punto del espacio?
- ❖ ¿Cómo interactúa el campo eléctrico con una partícula cargada?

Para el caso de las distribuciones discretas de carga, el procedimiento fue: considerar primero una carga puntual aislada, a continuación dos cargas iguales y después un dipolo eléctrico, un cuadrupolo y extender para desarrollos en multipolos y terminar con una distribución continua de cargas.

Para la distribución continua de carga, sólo se abordaron los casos de geometría simple: filamento, barra, aro, placa plana, disco y esfera.

En todo el proceso, las dificultades del tema fueron recurrentemente, las mismas:

- ❖ La consideración del carácter vectorial del campo eléctrico.
- ❖ Asumir la validez del principio de superposición de los efectos.
- ❖ Establecer para cada caso la función densidad de carga.
- ❖ Ejecutar los procesos de integración matemática.

¹⁸¹ Resnick, R. (1992). Obra citada

¹⁸² Tipler, P. *Física Vol. II*. Reverté. Barcelona, 1993

¹⁸³ Giancoli, D. *Física General Vol. II*. Prentice Hall Hispanoamericana.S.A. México.1988.

El tema “Campo Eléctrico” se desarrolló durante 20 horas efectivas de clase, en todos los ejercicios planteados y resueltos, se buscaba que los estudiantes:

- a) Comprenderían a cabalidad cuál era el problema.
- b) Con base en análisis, plantearan las posibilidades de solución.
- c) Usaran las simetrías (en caso de existir)
- d) Analizaran el comportamiento del sistema en los “casos al límite”
- e) Para cada caso en que era posible, se bosquejaba una representación gráfica de las “líneas de fuerza”. Para encontrar los vectores de campo eléctrico, se resolvía matemáticamente, se identificaban los vectores gráficamente y se distinguían en el bosquejo de líneas de fuerza.

Búsqueda de algunos preconceptos de los estudiantes con respecto al campo magnético.

Mediante interrogatorio directo, se investigaron las concepciones de los estudiantes con respecto al campo magnético. Nuevamente, en una sesión en un cubículo, en donde se contaba con imanes permanentes, limadura de hierro, pedacería de aluminio, trozos de alambre de cobre, alfileres de acero, un generador electrostático, pequeñas esferas metalizadas y picadura de papel, se plantearon preguntas del siguiente tipo:

Entrevista con TCR

E. ¿Por qué al colocar un alfiler en las cercanías del imán, el alfiler se mueve hacia el imán?

TCR. El alfiler se encuentra en el campo magnético producido por el imán y siente una fuerza de atracción.

E. ¿Por qué si ponemos el alfiler más alejado del imán no se mueve?

TCR. El alfiler sigue sintiendo una fuerza pero según nos alejamos del imán, la fuerza es más débil y no alcanza para moverlo.

E. Si ponemos cerca del imán un trozo de alambre de cobre ¿será atraído hacia el imán?

TCR. Sí.

E. El imán ¿atrae a cualquier trozo de metal?

TCR. Sí.

E. (Después de colocar el trozo de cobre cerca del imán) Como ves, el imán no atrae al cobre. ¿Cómo interpretas el hecho?

TCR. No lo sé, pensaba que atraen a todos los metales.

E. ¿Atraerá a un trozo de aluminio?

TCR. Ahora no sé, "puede que sí"

E. (Después de colocar un trozo de aluminio cerca del imán). Como ves, no lo atrae ¿cómo interpretas el fenómeno?

TCR. No lo atrae porque no está cargado.

E. Si colocamos a un objeto cargado eléctricamente cerca del imán ¿lo atrae?

TCR. Sí, en todos los casos es un fenómeno que tiene que ver con las cargas.

E. Entonces, si colocamos esta esfera (metalizada con pintura de aluminio) cargada en las cercanías del imán ¿la atraerá?

TCR. Sí.

E. No la atrajo ¿qué pasó?

TCR. Definitivamente, los imanes no atraen al aluminio, esté cargado o no.

E. ¿A qué lo atribuyes?

TCR. No lo sé, así debe ser.

Entrevista con MMM

E. Si colocamos un alfiler en las cercanías del imán ¿qué sucede?

MMM. El alfiler es atraído hacia el imán por efecto del campo magnético.

E. ¿Qué produce el campo magnético?

MMM. El imán.

E. Si colocamos el alfiler lejos del imán no es atraído ¿por qué?

MMM. El campo magnético, al igual que el campo eléctrico, varía inversamente con el cuadrado de la distancia, al estar lejos el alfiler, la fuerza es débil.

E. Si colocamos en las cercanías del imán a un trozo de alambre de cobre ¿qué sucede?

MMM. Nada, el imán no atrae al cobre.

E. ¿Por qué?

MMM. No lo sé, es sabido que los imanes atraen al hierro pero no al cobre o al oro.

E. ¿Cómo interpretas el fenómeno?

MMM. No lo sé, supongo que “tiene que ver con las cargas”

E. Si colocamos en las cercanías del imán a un objeto pequeño cargado, ¿lo atrae?

MMM. No, depende de cual sea el material del que está hecho el objeto, por ejemplo, el objeto cargado es de fierro, sí lo atrae, si el objeto cargado es de cobre, no lo atrae.

E. Si cargamos un trozo de papel y lo colocamos cerca del imán ¿lo atrae?

MMM. Sí, lo va a atraer porque está cargado.

E. Si entre el imán y un alfiler que colocamos cercano, coloco mi mano ¿qué sucede?

MMM. El alfiler no será atraído, la mano perturba al campo (el campo no puede atravesar a la mano).

Entrevista con CMM

E. Si colocamos un alfiler en las cercanías del imán ¿qué sucede?

CMM. El alfiler será atraído hacia el imán por efecto del campo magnético.

E. Al colocar el alfiler más lejos del imán, no es atraído ¿por qué?

CMM. Se sigue ejerciendo una fuerza sobre el alfiler, el campo magnético, igual que el campo eléctrico varía en razón inversa del cuadrado de la distancia y es débil, por lo que no alcanza a jalar al alfiler.

E. Si colocamos un trozo de cobre en las cercanías del imán ¿qué sucede?

CMM. Nada, el imán no actúa sobre el cobre.

E. ¿Por qué?

CMM. No lo sé, supongo que tiene que ver con la carga eléctrica.

E. Si cargáramos el trozo de cobre ¿sería atraído?

CMM. No, no tiene que ver con la carga sino con la distribución de carga.

E. Si cargáramos eléctricamente a un trozo de papel y lo colocáramos en las cercanías del imán ¿el papel será atraído por el imán?

CMM. No, no va a ser atraído, si el papel está cargado y en movimiento, será desviado por el imán.

E. Si introdujéramos el imán y un alfiler en un cubo lleno de agua, ¿el alfiler será atraído en la misma forma en que ocurrió como lo hicimos (en el aire)?

CMM. No, la fuerza varía con la densidad del medio, por ejemplo, en agua debe ser más débil que en el aire y en aceite debe ser más débil que en el agua.

Las entrevistas realizadas con la totalidad de los alumnos del grupo (algunas de ellas fueron realizadas en grupos de tres o cuatro estudiantes simultáneamente), permitió agrupar las concepciones que pudieran considerarse como representativas de cada conjunto de estudiantes, en la siguiente forma:

El **subgrupo 1**, como ya se mencionó, constituido por los 28 estudiantes cuyas explicaciones causales para los fenómenos presentados eran las menos consistentes, concebían al campo magnético de la siguiente forma:

- ❖ Consideran que las únicas fuentes generadoras de campo magnético, son los imanes.
- ❖ Tienen dificultades para asociar la intensidad de campo con la distancia de separación a la fuente.
- ❖ No perciben la importancia que reviste el hecho de que los campos magnéticos sean no conservativos
- ❖ Afirman que los campos magnéticos actúan sobre cargas eléctricas en reposo.
- ❖ Son indiferentes al hecho de que las fuerzas magnéticas no cumplan en forma fuerte, la tercera ley de Newton (es decir, la fuerza no está dirigida a lo largo de la línea que une a los elementos de corriente o que actúe perpendicularmente tanto a la dirección de la velocidad de una carga en movimiento como del vector campo magnético).
- ❖ Asocian la permeabilidad del medio con la densidad del mismo (la fuerza magnética puede atravesar un papel delgado, pero le cuesta más trabajo atravesar una hoja de hierro del mismo espesor)
- ❖ No existe explicación al fenómeno de que un imán atraiga a un trozo de hierro y no lo haga con un trozo de cobre (así debe ser, es un hecho)
- ❖ El campo magnético es otra forma de nombrar al campo eléctrico, actúa como intermediario entre cargas (aun en estado de reposo).
- ❖ No identifican al campo magnético como una propiedad vectorial.
- ❖ Aceptan que es válido el principio de superposición, pero no lo asocian como una operación entre vectores.

Para los 11 estudiantes del **subgrupo 2**, el campo magnético:

- ❖ Además de los imanes, puede ser generado por las corrientes eléctricas.
- ❖ Identifican la variación de la intensidad del campo, como una función de la distancia de separación a la fuente.
- ❖ Identifican al campo magnético como un campo vectorial.
- ❖ Comprenden el principio de superposición e identifican las operaciones matemáticas inherentes.
- ❖ Afirman que los campos magnéticos actúan sobre algunos cuerpos, en función de que éstos estén o no cargados eléctricamente.
- ❖ Tampoco conceden importancia a que:

- a) El campo magnético sea no conservativo.
- b) Las fuerzas magnéticas actúan perpendicularmente a la dirección del movimiento de las cargas eléctricas.
- ❖ Asocian el hecho de que los imanes atraigan al hierro y no al cobre con “alguna distribución de cargas libres”
- ❖ Intuyen la permeabilidad del medio cuando identifican que la fuerza magnética que ejerce un imán sobre un trozo de hierro, no es la misma en el vacío que en el agua (por ejemplo).

Finalmente, los cinco estudiantes que identificamos como **subgrupo 3**, conciben:

- ❖ Las fuentes generadoras de campo magnético son los imanes y las corrientes eléctricas.
- ❖ La intensidad de campo magnético varía como el cuadrado inverso de la distancia a la fuente.
- ❖ El campo magnético actúa sobre las cargas eléctricas sólo si están en movimiento.
- ❖ El campo magnético actúa perpendicularmente a la dirección del vector velocidad de la partícula cargada.
- ❖ La superposición de los efectos producidos por más de un campo, obedece las reglas de operaciones vectoriales.
- ❖ Existen características que hacen perfectamente distinguibles a los campos magnéticos de los eléctricos (El campo eléctrico interactúa con una partícula cargada en reposo, el campo magnético no. El campo magnético actúa sobre un trozo de hierro, el campo eléctrico no.)
- ❖ La intensidad magnética del campo, es función de la permeabilidad del medio.
- ❖ Que los imanes atraigan al hierro y no al cobre “debe” obedecer a la diferencia de estructuras moleculares.
- ❖ No identifican que el campo magnético sea no conservativo.

Construir el concepto “campo magnético”, presentó una mayor dificultad conceptual que para el caso del campo eléctrico, fue precisamente en este momento del proceso enseñanza aprendizaje que se evidenció como un acierto, el haber presentado las ecuaciones de Maxwell, como se menciona en las páginas 85 a 88 de este escrito. Durante el desarrollo del programa de la asignatura, frecuentemente se hizo mención a dichas ecuaciones y particularmente, al hecho de que un campo eléctrico variable en el tiempo, produce un campo magnético y viceversa. Los estudiantes, aun sin una comprensión cabal del fenómeno, desde el inicio del curso identificaban a los campos eléctrico y magnético, como componentes de las ondas electromagnéticas. En la comprensión de este fenómeno, resultó de gran valía revisar con los alumnos la construcción del modelo mecánico que diseñó Maxwell para establecer las ecuaciones del campo electromagnético. Dicha revisión sirvió para que los alumnos conocieran la magnitud del problema que representó, en su momento, el mostrar que los campos eléctrico y magnético forman parte del mismo fenómeno, sin embargo, su capacidad para resolver problemas de orden práctico, en los que fuera necesaria la comprensión del comportamiento del campo magnético, fue muy deficiente en primera instancia. Las dificultades más comunes fueron:

- ❖ Manejo deficiente de los operadores vectoriales gradiente, divergencia y rotacional.
- ❖ Dificultad para utilizar los teoremas de Stokes y Gauss.

- ❖ La solución de ejercicios sólo resultaba exitosa en los casos en que la simetría de los problemas permitía suponer a priori las direcciones de las fuerzas y/o los campos.
- ❖ Recurrentemente, los estudiantes pretendían utilizar el principio de conservación de la energía, sin considerar el carácter no conservativo de las fuerzas magnéticas.

Estas dificultades conceptuales fueron abordadas de diferentes maneras:

a) Con respecto al uso y comprensión de los operadores vectoriales, se tuvo que hacer una digresión en el desarrollo del programa de la asignatura y dedicar 5 horas efectivas de clase para la explicación correspondiente, se asignaron series de ejercicios para ser resueltos en equipos de tres estudiantes, los ejercicios que presentaban mayores dificultades para su solución, se llevaron al pleno del grupo y fueron resueltos en detalle en el aula. Se estima que los estudiantes dedicaron en promedio 10 horas de estudio fuera del aula. Con estas acciones se logró un manejo del tema que aun cuando fuera elemental, resultaba aceptable.

b) Se expusieron en clase los teoremas de Stokes y Gauss, se demostraron formalmente, pero se buscó que el estudiante lograra una comprensión más intuitiva, que percibiera los significados de dichos teoremas mediante su uso en ejemplos físicos, particularmente referidos al caso del electromagnetismo.

c) Se asignaron series de ejercicios para ser resueltos por equipos de tres estudiantes, los ejercicios que mostraban mayor dificultad de solución, fueron presentados al pleno del grupo y resueltos en detalle. En los ejercicios se procuró abordar los casos en los que las direcciones de los campos o las fuerzas no fueran trivialmente conocidas.

Una vez que el grupo tuvo una comprensión aceptable del comportamiento de los campos eléctricos y magnéticos, abordamos de una manera sistemática y formal, el aspecto histórico de la teoría de campos; Se analizaron tanto los postulados físicos como los filosóficos de Newton, Faraday y Maxwell, tanto los desarrollos teóricos como los experimentales, fueron ubicados en el tiempo y en el contexto sociocultural de la época. Esto permitió hacer un desarrollo histórico-crítico de la teoría de Maxwell.

Evaluación del desempeño de los estudiantes en el curso

Los estudiantes fueron evaluados fundamentalmente en función de su participación positiva en el desarrollo del curso, se tomaron en consideración los trabajos realizados fuera del aula (lecturas, ejercicios, investigaciones, etcétera). Sin embargo, no se puede romper con una tradición, constituida por los exámenes parciales escritos, puesto que es una manera "natural" de "presionar" al alumno a que estudie con profundidad los temas tratados en el salón de clases. Se realizaron tres exámenes parciales en los que se cuidó mantener un balance entre "preguntas conceptuales" (es decir, reactivos para cuya solución no era indispensable el hacer desarrollos matemáticos, lo importante era la interpretación del fenómeno planteado) y "problemas" (ejercicios simples de aplicación práctica). Por otro lado, era indispensable cumplir con el reglamento general de exámenes de la institución y por tanto, las calificaciones se ponderaron con las obtenidas por los estudiante en el laboratorio.

Los resultados numéricos que se anotaron en las actas oficiales correspondientes al curso fueron los que a continuación se enlistan:

Cuadro 5.4

CLAVE	CALIF.	CLAVE	CALIF
JAL	N.P.	DJP	7
FAB	5	HJA	8
CAH	N.P.	JJV	7
GAA	N.P.	KLA	7
ABH	5	ALL	9
RCH	8	VLV	8
RCS	8	AMP	5
OCH	7	VMM	N.P.
SCG	7	EMB	8
TCR	5	CMM	10
KCH	7	MMM	9
JCM	7	AOC	9
GCG	8	MOG	8
JDZ	7	COR	7
JFM	7	LRG	7
AFP	5	IRS	5
SGG	8	GRT	9
LGH	8	JSR	7
LGM	10	ASF	7
PHA	N.P.	HVR	7
RHM	8	IVO	10
EHT	7	MVL	8

Cuadro 5.4. Muestra las calificaciones que fueron asentadas en las actas oficiales, al término del curso sobre electromagnetismo.

Resumiendo los Resultados numéricos obtenidos por los estudiantes, en el curso electromagnetismo fueron:

Calificación	Frecuencia
N.P.	2
5	6
7	15
8	11
9	4
10	3
Promedio	7.40
% No Acreditado	20.0
% de Abandono	5.0

A continuación, se incluyen resultados de 3 diferentes grupos de la asignatura electromagnetismo, a los cuales impartí clase en los semestres 98/1, 98/2 y 99/1

	Semestre 98/1	Semestre 98/2	Semestre 99/1
Calificación	Frecuencia	Frecuencia	Frecuencia
N. P.	11	4	8
5	2	5	15
6	6	1	3
7	13	12	2
8	11	15	3
9	0	7	9
10	6	9	2
Promedio	7.5	7.5	4.0
% No Acreditado	26	16	55
% Abandono	22.0	7.5	19.0

Estos resultados no son comparables entre sí dado que no se establecieron hipótesis de carácter estadístico, tampoco fungió ningún grupo como testigo a una prueba inferencial, sin embargo, si un aspecto es destacable es el que se refiere al abandono del curso, puesto que en el caso del grupo 08 con el que se ensayó esta propuesta de enseñanza, muestra el mejor valor obtenido. Como se explica en el cuerpo de este escrito, los cambios obtenidos son fundamentalmente de orden cualitativo y no cuantitativo.

Conclusiones:

1.- Los resultados obtenidos por los estudiantes inscritos en el grupo 08 con el cual se ensayó la propuesta de enseñanza a que se refiere este escrito, nos permiten afirmar que, una fracción significativamente importante de los alumnos del grupo, lograron una construcción individual de la teoría electromagnética de Maxwell y que, simultáneamente se logró una construcción colectiva de dicha teoría. El balance entre dichas construcciones alcanzó el equilibrio deseable y se manifestó a través de los debates en el seno del grupo. El análisis de los diversos problemas de carácter teórico o práctico que se presentaban, permitía observar que se lograron consensos alrededor de las interpretaciones científicas sobre los fenómenos tratados, contextualmente aceptadas por la comunidad científica.

2.- La propuesta cumple cabalmente con el propósito de presentar a otros docentes interesados en el tema, datos históricos y filosóficos relacionados con la teoría electromagnética de Maxwell, que se espera sirvan para enriquecer su actuación frente a grupos de estudiantes; asimismo se espera que los datos presentados sirvan como referencia para ahondar en aspectos de la teoría que por lo regular, no son presentados en los libros de texto comúnmente recomendados en los cursos introductorios sobre el tema.

3.- Este trabajo presenta un panorama general del estado que guarda la enseñanza del electromagnetismo en la Facultad de Química de la UNAM y aporta algunos datos relativos de

resultados obtenidos en la Facultad de Ciencias de la misma institución. Menciona los programas establecidos para mejorar el aprovechamiento de los estudiantes en los primeros semestres en las Facultades de Química e Ingeniería de la UNAM así como los resultados obtenidos a la fecha. El conocimiento de estos datos, permitirá al docente ubicar algunos de los problemas más comunes en el proceso de enseñanza-aprendizaje del electromagnetismo y facilitará la búsqueda de soluciones.

4.- Constituye un aporte destacable de esta tesis la ubicación de los posibles orígenes de algunos preconceptos frecuentes (y en algunos casos generalizados) de los estudiantes y, obviamente la enumeración de estos preconceptos que, desde la óptica del constructivismo son los puntos nodales en los que podemos basar nuestra intervención para coadyuvar a la actividad constructiva del estudiante.

5.- La propuesta de enseñanza sugiere un orden temático y, a través de su ejecución, se identificaron algunos problemas conceptuales comunes en los grupos de estudiantes, con base en los resultados obtenidos, puede planearse una distribución de tiempo más adecuada, acorde con los intereses tanto del grupo como del profesor o de la institución.

Capítulo 5

CONCLUSIONES GENERALES

1.- Al finalizar el curso, la mayoría de los estudiantes del grupo logró una construcción personal del formalismo de Maxwell, que se manifiesta y percibimos a través de los comportamientos verbales de cada estudiante, mediante la comprobación de que puede analizar los fenómenos que le son presentados y de que es capaz de usar y transferir conocimientos, demostrando haber adquirido destreza intelectual para abordar tareas teóricas o prácticas relacionadas con el electromagnetismo. Simultáneamente se hizo una construcción colectiva de dicha teoría, misma que se manifestaba en las diversas participaciones de los estudiantes en los debates, exposiciones, ensayos y durante las sesiones de solución de ejercicios; esta construcción fue lograda mediante un proceso exitoso de trabajo, que promovió un intenso intercambio de significados tanto entre los estudiantes como entre los estudiantes y el profesor y finalmente, entre los estudiantes y el conocimiento científico contextual.

2.- El proceso de trabajo seguido en el curso, provocó el desarrollo de un conjunto de actitudes y aptitudes en los alumnos, derivadas de la reflexión tanto individual como colectiva así como de la deliberación en conjunto, que necesariamente desembocaron en la capacitación de los estudiantes para abordar la comprensión de la teoría y para relacionarla de manera efectiva con las diferentes áreas del conocimiento de su campo de acción.

3.- Un logro específico de esta propuesta desarrollada bajo el referente teórico del constructivismo, consiste en haber alcanzado un balance adecuado entre los siguientes aspectos:

a) La capacitación de los estudiantes en el sentido de lograr el desarrollo de habilidades intelectuales para poder resolver problemas de orden práctico. Esta capacitación fue lograda, a través de las actividades planeadas para el curso, consistentes fundamentalmente en: Exposiciones teóricas por parte del profesor; planteamiento de preguntas dirigidas con la finalidad de provocar el debate entre los estudiantes del grupo, asignación de lecturas para ser analizadas, primero en grupos pequeños y posteriormente ante el pleno del grupo, resolución de problemas, realización de experiencias de cátedra, y otras.

b) La elaboración personal y colectiva de un conjunto de procesos orientados a la adquisición, manejo y comprensión de las informaciones, habilidad que fue lograda mediante la realización de resúmenes de lecturas, ensayos, fichas bibliográficas, mapas conceptuales, así como con el diseño, por parte de los estudiantes, de exámenes y guías de estudio.

c) La paulatina aceptación de los estudiantes respecto a asumirse como responsables de su propia formación, abandonando su conformidad con las prácticas comunes de actuar como "receptores pasivos". A esta elaboración individual contribuyó el planeamiento cuidadoso del curso en donde se evitó exigir en demasía a los estudiantes, para evitar que adoptaran el enfoque tradicional que consiste en "estudiar para el examen", que no tuvieran necesidad de "sólo cumplir" los requisitos necesarios para que sea "contabilizada" su tarea, memorizar temporalmente algunos conceptos para "pasar el examen", asimismo se les informó con todo detalle el programa de estudios, tratando de justificar cada uno de los contenidos, las metas intermedias y finales para que, el estudiante dejara de percibir las diferentes tareas como imposiciones externas; al entender los motivos de inclusión de cada contenido,

el estudiante abandonaba la costumbre de abordar dichas tareas con ausencia de reflexión, actividad que por lo general los lleva a enfocarse en elementos sueltos y logrando un “aprendizaje” literal y arbitrario, es decir, una memorización temporal. La actividad continua de explicar la inclusión de cada tema en el programa de estudios, apoyado por las necesidades que tiene el profesional de la química para conocer y manejar los conceptos de la teoría electromagnética, sirvió de base para que el estudiante tuviera la intención de comprender, la motivación intrínseca para mantener una fuerte interacción con el contenido temático, al intentar relacionar el conocimiento adquirido con el anterior, al relacionar los conceptos adquiridos con la experiencia cotidiana, etcétera.

d) La elaboración de procesos orientados a incorporar a su estructura cognitiva, los sistemas de pensamiento construidos históricamente. Esta incorporación se llevó a cabo a través de las diversas actividades grupales en las que se provocaba el debate, la lluvia de ideas, el contraste de hipótesis, el análisis de resultados, las interpretaciones tanto personales como colectivas de los fenómenos que se presentaban, hasta lograr que el grupo aceptara como “normal” el que las diversas interpretaciones sufrieran continuamente rectificaciones, induciéndolos finalmente, a la factibilidad de las elaboraciones tanto colectivas como personales.

4.- Un alto porcentaje de los estudiantes del grupo logró comprender las motivaciones científicas, sociales y culturales de los individuos y de las comunidades científicas involucradas en el establecimiento y evolución del electromagnetismo, mérito que puede atribuirse de manera directa a esta propuesta de enseñanza ya que una de las formas de intervención, que con mayor frecuencia se usó para resolver los problemas conceptuales del grupo de estudiantes, fue el recurrir a las lecturas en las que se abordaba el planteamiento y desarrollo de las diferentes teorías científicas. A través de estas lecturas y su posterior análisis y debate, se observó que se incrementaba notablemente la motivación intrínseca de los estudiantes por conocer la teoría electromagnética, crecía el interés y se lograba una mejor comprensión de los conceptos científicos como resultado de conocer el contexto histórico en que se dio su aparición, desarrollo y perfeccionamiento posterior; Particularmente hubo un reconocimiento de que la ciencia es cambiante y que, por ende, el conocimiento científico actual es susceptible de ser transformado. Este reconocimiento fue crucial en el desenvolvimiento de los estudiantes puesto que fueron mutando la aceptación acrítica de cualquier teoría cuyo único mérito fuera “estar escrita en el libro”, aceptando que esas teorías pueden ser modificadas, perfeccionadas o rechazadas. Los debates en el seno del grupo capacitaron a los estudiantes para distinguir con claridad entre los argumentos basados en evidencias, en datos científicos y los que no lo están; Al estudiar algunos ejemplos de controversias científicas (Weber-Newton o Faraday-Newton, por ejemplo) entendieron algunas de las formas en que las ideas científicas van cambiando y les permitió comprender como el desarrollo histórico de una teoría científica, en nuestro caso la teoría electromagnética de Maxwell, se relaciona de manera directa con el conocimiento científico actual, con las teorías científicas aceptadas como válidas en el campo de la química (que son de su interés directo) y con el entorno sociocultural de cada uno de los estudiantes del grupo.

5.- Los problemas de aprendizaje encontrados fueron numerosos: Al inicio del curso fue necesario adoptar estrategias variadas para incorporar a los estudiantes a la dinámica que se había diseñado. Recordemos que la mayoría de los estudiantes del grupo de trabajo venían de recibir de 12 a 14 años de enseñanza escolarizada, durante los cuales el concepto “aprender” se refería sólo a desarrollar una capacidad que les permitiera, al contestar un examen, recordar lo que habían leído (en sus notas o en un solo texto) una o dos jornadas previas, sin atender a la comprensión de los conceptos, leyes y datos que les fueron presentados ya sea de manera verbal durante las clases o a través de lo que leyeron. Dadas estas características, los estudiantes, de manera consciente o inconsciente desplegaron

un conjunto variado (aunque conocido) de acciones tendientes a evitar las tareas de aprendizaje (el significado que le estoy dando al vocablo tarea es el de: conjunto de actividades diseñadas y dirigidas para lograr algo y no el común de asignar un trabajo para ser realizado por el alumno fuera del aula), mismas que iban desde no contar con un bolígrafo, no traer papel para escribir, carecer de calculadora de bolsillo, solicitar continuamente que se repitieran las cuestiones planteadas, tratar de que la discusión o explicación se llevara a efecto en un nivel cognitivo más bajo del requerido, aparentar incapacidad para la realización de la tarea, pedir explicaciones sobre aspectos triviales así como presentar una resistencia pasiva a participar en el diálogo; copiar o sólo repetir lo que otros han dicho, etcétera.

En virtud de que la disposición de los estudiantes a participar en las tareas de comprensión depende fuertemente de la percepción que tengan del valor de la tarea, fue necesario prestar mucha atención a la relación que la comprensión de dichas tareas tenía con el ejercicio profesional (posterior) en el ámbito de la química, es decir, hubo de ser muy selectivo en los ejemplos a tratar, asimismo y tomando en consideración que los estudiantes tienen por costumbre "trabajar por grados", se hizo ostensible la "toma de nota" de las participaciones de los estudiantes "con fines de integrar la calificación final". Abundando en esta explicación, se hizo un gran énfasis en el peso porcentual que en la evaluación del estudiante tenían los exámenes parciales, sin embargo, después de algunos debates, se hizo del conocimiento del grupo que algunos estudiantes quedaban exentos de la presentación de dichos exámenes, debido a su desempeño notable en las actividades del grupo, lográndose de inmediato una participación más nutrida en las tareas a desarrollar. Para promover la utilización de los conocimientos que los estudiantes estaban adquiriendo, se les pidió que diseñaran los exámenes parciales, acción que los hacía concientes de ¿qué saben? y ¿qué es importante?, de igual manera, se les pidió que diseñaran guías de estudio y las discutieran primero en grupos pequeños y al final en el pleno del grupo. Durante los diferentes y continuos debates quedó claro que para los fines que perseguíamos, tenían más importancia las interrogantes que las respuestas. Simultáneamente con estas acciones, fue necesario intervenir constantemente para que los alumnos, durante las discusiones, valoraran y respetaran las contribuciones de los demás; Se procuró crear una atmósfera cálida de trabajo, la confianza del grupo de estudiantes en el profesor fue creciente y eso permitió un mejor desempeño del grupo como colectivo de trabajo.

6.- Con respecto a los problemas de aprendizaje referidos de manera exclusiva al curso sobre teoría electromagnética debo ser explícito al afirmar que existía, desde luego, un problema serio de aprendizaje en más del 50% de los estudiantes del grupo (28 estudiantes) debido a que, según se demostró con los resultados obtenidos en los exámenes diagnóstico, en las entrevistas personales y en las participaciones de dichos estudiantes en los debates,, se observaron deficiencias notables en su instrucción previa, dichas deficiencias iban desde problemas de comprensión de lectura, manejo defectuoso de las operaciones matemáticas fundamentales hasta el desconocimiento de matemáticas más avanzadas como trigonometría, geometría analítica y cálculo diferencial integral. Se encontró además que el conocimiento que tenían respecto a la mecánica clásica así como sobre los rudimentos de las teorías químicas era pobre y defectuoso. En general, los estudiantes se referían a una gran diversidad de conceptos, repitiendo en la mayoría de los casos algunas frases de las que sólo "recordaban" algunos nombre sin significado real.

Estos problemas de aprendizaje fueron tratados, según se reseña en esta tesis, con intervenciones que iban desde las dinámicas de grupo en donde participaban todos los estudiantes, la realización de tareas de aprendizaje tanto en el aula como mediante la asignación de trabajos extraclase, mismas que fueron mutando gradualmente desde realización de ejercicios poco exigentes, de tipo

algorítmico en los que se recurre casi de manera exclusiva a la memoria del estudiante, para después pasar a tareas constructivas en donde la exigencia cognitiva para su realización requiere de comprensión de conceptos y de movilización de conocimientos. Asimismo, se realizaron y analizaron lecturas y, apoyados en la heurística de la historia, se superaron algunos problemas de aprendizaje de los que se da cuenta más adelante.

7.- Durante el tiempo que duró la ejecución de la propuesta de enseñanza se encontraron varios problemas, la mayoría de ellos pudo ser resuelta y sólo algunos persistieron. Destacaremos los siguientes:

a) Modificar la conducta de los estudiantes del grupo, acostumbrados a presentarse al aula con sólo un cuaderno y un bolígrafo para realizar durante las diversas sesiones, exclusivamente una "toma de notas" y esto sólo en el mejor de los casos. Las notas que los estudiantes toman durante la clase, ocupan totalmente su atención durante el tiempo que se dedica a la exposición y al abandonar el aula dichas notas "pasan al olvido" debido a que, por lo general, no son revisadas. En las ocasiones en que se programa un examen escrito, el estudiante recurre a dichas notas, pero por lo general le son ininteligibles. Este tipo de acciones para diferir el aprendizaje, obstaculizó, en tanto existió, el desarrollo del plan de trabajo. Modificar esta conducta representó un gran esfuerzo, hubo de ser desplegado un conjunto amplio de estrategias para incorporar a dichos alumnos a la dinámica del grupo como por ejemplo, formar grupos pequeños para discusiones, nombrar en cada grupo un solo redactor, pedir que en cada grupo nombraran un vocero, abrir discusiones a todo el grupo, resolver ejercicios en el pizarrón, realizar algunas experiencias de cátedra, etcétera.

b) En la mayoría de las ocasiones en que se formaban grupos pequeños para debatir algunos aspectos de los temas de estudio, se procuró integrar equipos con estudiantes de aprovechamiento alto, medio y bajo y se estableció e insistió en la rotación de los papeles que dichos estudiantes jugaban en los equipos (secretario, relator, vocero, etcétera). Esto con el objetivo de integrar a los estudiantes entre sí y propiciar que todos participaran en los debates.

c) Para poder llevar a cabo el análisis de lecturas, dado que no existe el acervo bibliográfico correspondiente y, cuando éste existe es insuficiente, se formó un comité editorial (que también se fue rotando entre los estudiantes del grupo), que se encargaba de reproducir las lecturas, compaginarlas y distribuir las. Para el análisis de lecturas se formaron equipos de trabajo y en este rubro se buscaba que en cada equipo quedara incluido al menos un estudiante que fuera capaz de traducir del inglés al español puesto que un porcentaje considerable de las lecturas estaba escrito en ese idioma. El que los estudiantes sólo conozcan el español es un impedimento de importancia considerable tanto en el periodo de estudios como en el ejercicio de su profesión (este fue uno de los problemas que no pudo ser resuelto satisfactoriamente y por tanto las lecturas se fueron circunscribiendo a ser exclusivamente las que están escritas en español).

d) Como se evidenció, con base en los exámenes diagnóstico, la mayoría de los estudiantes presentaron serias deficiencias en su instrucción previa, en lo referente al conocimiento de las matemáticas, eso representaba un problema difícil de solucionar. Durante las exposiciones en el aula, se procuró ser muy explícito en cuanto a los fenómenos que se presentaban, se evitaron (hasta donde esto fue posible) las deducciones exclusivamente matemáticas o presentar resultados y conclusiones basadas únicamente en la interpretación de expresiones de ese tipo. Sin embargo, se hizo saber en todo momento, la necesidad que el estudiante tiene de salvar este obstáculo. Se recomendó bibliografía específica, se remitió a los estudiantes a las asesorías que el Departamento de Matemáticas de la

Facultad de Química tiene establecidas. Se privilegiaron las interpretaciones fenomenológicas por sobre los desarrollos teóricos y en casos en que era imprescindible hacer desarrollos matemáticos, estos se hacían "paso a paso", explicando cada uno de ellos. Este problema no fue resuelto satisfactoriamente.

e) En la realización de trabajos extraclase, algunos alumnos al inicio del curso no colaboraban con su equipo o bien su colaboración era escasa y desde luego, esa actitud dificultaba su aprendizaje. Al detectar a dichos estudiantes, se hizo que gran parte del debate recayera en ellos, de esa forma se dieron cuenta de los resultados negativos que propiciaba su falta de cooperación, que esa actitud representaba un obstáculo para el avance del aprendizaje de todo el equipo de trabajo, de esa manera, fueron incrementando su actividad hasta que, sus aportaciones fueron en igual medida que las de sus compañeros.

f) Las formas y los momentos de intervención pedagógica estuvieron influenciados de manera directa por dos factores obvios: el tiempo del que disponíamos para el desarrollo del curso y las intenciones educativas de la Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México; sobre la marcha, se tomaron algunas decisiones que incidieron notablemente en los resultados obtenidos con esta propuesta de enseñanza, por ejemplo: Una vez construido colectivamente el concepto carga eléctrica, analizamos los experimentos de Franklin, mismos que por ser cualitativos no presentaban mayor problema, pero al analizar el experimento realizado por Coulomb, para establecer la ley de interacción entre partículas cargadas, presentó la siguiente cadena de deficiencias: Entender el funcionamiento de la balanza de torsión que empleó Coulomb, requirió dedicar tiempo a explicar los conceptos torca, elasticidad, módulo de torsión y segunda ley de Newton. Al establecer la ley de Coulomb se evidenció que un porcentaje elevado de los estudiantes del grupo no entendían el significado de la proporcionalidad directa o inversa, tampoco tenían un conocimiento claro del concepto de partícula y al establecer que la ley de Coulomb satisface la tercera ley de Newton, tampoco entendían esta tercera ley. La decisión fue hacer una digresión y dedicar tiempo al estudio de las Leyes de Newton pues más adelante en el curso, cuando tratáramos las ideas de Faraday, era indispensable la comparación entre ambas teorías, sin embargo, la construcción de la teoría de Newton requería conocimientos básicos de matemáticas, proporcionalidad, trigonometría elemental, concepto de límite, cálculo diferencial, álgebra, sistemas coordenados, etcétera, conocimientos de los que una parte considerable de los alumnos carecían. Como, evidentemente, esta cadena de deficiencias podría extenderse indefinidamente, tuve que aceptar que no es posible establecer la zona de desarrollo próximo para la totalidad de los estudiantes, que algunos necesariamente lograrían una construcción deficiente. Esta situación se repitió en varios momentos del desarrollo del curso, al establecer la validez del principio de superposición para el campo eléctrico nuevamente el impedimento era el álgebra de vectores, para lo cual era necesario conocer trigonometría, misma que requiere de la geometría clásica, que para estudiarla es necesario conocer los rudimentos del álgebra, etcétera. El último caso que mencionaré se refiere al establecimiento de la ley de Gauss de la electricidad en forma integral, que para establecer adecuadamente, requerimos el concepto de flujo, así como descomponer un vector en componentes ortogonales, producto interior de vectores, concepto de integral de superficie, elemento diferencial y otros.

A este respecto me queda una insatisfacción, sin embargo, creo que ningún profesor puede pretender resolver esta problemática de manera aislada, que es un problema que merece atención colegiada, al abordarlo con diferentes enfoques, con apoyo institucional, seguramente surgirán alternativas de solución.

8.- Sobre los resultados obtenidos pueden hacerse los siguientes comentarios previos a realizar una evaluación general de la ejecución de la propuesta de enseñanza:

Sobre los logros de aprendizaje de los estudiantes, cuantitativamente, no encontraríamos una diferencia notable con los aprendizajes logrados en un curso tradicional. Finalmente, el programa de estudios es el mismo para ambos y, como quedó demostrado, el grupo con el que se ensayó la propuesta de enseñanza, era un grupo típico en todos los sentidos; sin embargo, es notable que con la propuesta constructivista, los alumnos lograron una comprensión de la teoría electromagnética, que va más allá de solamente estar capacitado para resolver algunos ejercicios de carácter práctico, algorítmicos y por ende rutinarios. Ha de destacarse que el conjunto de estudiantes que conformaron el grupo 08 de electromagnetismo lograron, entre otros aspectos:

a) Hacer modificaciones sustanciales en el desarrollo de sus planes individuales de avance dentro de su carrera, pues como un resultado de los análisis, debates e investigaciones llevadas a cabo en el curso, les fue evidente que, hasta antes de iniciar el curso sobre electromagnetismo, estaban aceptando acriticamente las teorías que les eran presentadas, llevaban a cabo aprendizajes no significativos y por tanto, esos aprendizajes eran simplemente memorizaciones temporales, para utilizar o movilizar dichos conocimientos, pretendían sustituir los procesos de análisis en una aplicación indiscriminada de “fórmulas matemáticas” de cuyo origen poco o nada sabían, asumieron que en su pasado reciente habían actuado como unos “cazadores y escritores (no escritores puesto que éstos son creativos) de fórmulas”, aceptaron que habían sido poco reflexivos al respecto.

b) Comprendieron que era, a todas luces, inconveniente “tratar de sólo aprobar el curso”, sin importar el logro de aprendizajes significativos. Particularmente reconocieron que las deficiencias mostradas al inicio del curso en aspectos como el conocimiento precario de matemáticas o física elementales podrían soslayarse y con alta probabilidad “seguirían avanzando en sus estudios”, sin embargo, cada vez irían entendiendo menos (o con mayor defecto) las teorías científicas útiles en el campo de su futuro ejercicio profesional.

c) Se generó en los estudiantes una notable inquietud por relacionar efectivamente los conceptos desarrollados en un curso con los que les eran presentados en otros, es decir, se operó en ellos una capacidad para movilizar el conocimiento, se dio un claro intento por integrar los conocimientos, que hasta el momento permanecían en su estructura cognitiva como elementos aislados, sin relación o conexión clara de unos con otros. Concluyeron que, llegado el momento de ejercer su profesión en el ámbito de la química, serían valiosos si se asumían como unos “solucionadores creativos, eficaces y eficientes de problemas reales”

d) Dentro de los hábitos que fueron cambiados en el desarrollo del curso, ha de destacarse que los estudiantes dejaron de ser “tomadores de notas” para convertirse en “participantes activos en la clase”.

9.- El diseño y la ejecución de esta propuesta de enseñanza se efectuaron, atendiendo al desarrollo de los estudiantes tanto en el plano intelectual como al abordar los contenidos curriculares, considerando la validez de diversas aproximaciones psicológicas, procurando incidir en los intereses de los estudiantes, en su motivación intrínseca y en el planteamiento de las necesidades de los profesionales de la Química. De esa manera, los contenidos curriculares fueron orientados para lograr la construcción de la teoría electromagnética de Maxwell, atendiendo tanto al diseño como la implementación de estrategias de aprendizaje y de enseñanza, entre las cuales se privilegiaron las tareas

de aprendizaje cooperativo puesto que se pretendía una interacción intensa entre los estudiantes, entre los estudiantes y el profesor así como entre los estudiantes y el conocimiento contextual. La postura fundamental adoptada en esta tesis fue postular la existencia y prevalencia de procesos activos en la construcción del conocimiento, es decir, la validez del marco teórico de esta propuesta descansa fuertemente en aceptar la importancia de la actividad constructiva del alumno en la realización de los aprendizajes escolares. La convergencia de diversas aproximaciones psicológicas a que se refiere este párrafo, debe entenderse como una agregación selectiva, no una utilización pragmática indiscriminada de las diversas corrientes; aceptamos, por ejemplo, que la explicación del comportamiento y el aprendizaje puede hacerse desde la teoría sociocultural de Vigotsky, a partir de mecanismos intelectuales endógenos como lo postula Piaget o partiendo de la teoría de la asimilación y el aprendizaje de Ausubel.

Esta propuesta de enseñanza sostiene que el estudiante, en lo que se refiere a los aspectos cognitivos y sociales del comportamiento no es ni un simple producto de su medio ambiente ni tampoco un simple resultado de sus gestiones intelectuales internas sino una construcción propia que se va modificando día con día como resultado de ambas acciones, en donde, la construcción depende fundamentalmente de los preconceptos que el aprendiz tenga de la tarea a resolver y de la actividad tanto interna como externa que realice.

10.- Un resultado directo de la ejecución de esta propuesta de enseñanza es el cambio de actitud operado en los estudiantes respecto de la manera de abordar los contenidos curriculares, de las acciones que realizaban tanto dentro como fuera del aula, del tiempo y esfuerzo que dedicaron al aprendizaje de la teoría electromagnética de Maxwell, en general, se observó un cambio tanto de actitudes como de aptitudes a las que me he referido en párrafos anteriores. De igual manera, como resultado de la ejecución de esta propuesta de enseñanza, mi percepción como profesor del grupo, ha sido modificada de manera sustantiva. Cambia, por ejemplo, la forma de evaluar si los estudiantes han comprendido un concepto; en cursos anteriores, con el método de enseñanza "tradicional", me bastaba con aplicar un examen, que invariablemente estaba constituido por el planteamiento de problemas de aplicación de dicho concepto y para calificar el examen, bastaba con verificar el uso correcto del concepto, que el estudiante llegara al resultado esperado, que usara adecuada y eficientemente las herramientas matemáticas involucradas en la solución de los problemas, dando poca importancia a los procesos mentales seguidos por el estudiante. Un resultado casi invariable en dichos cursos era que, pasado poco tiempo de la aplicación del examen, al intentar usar nuevamente ese concepto, el estudiante no recordaba el concepto, ni la forma de utilizarlo, evidenciando que se había dado un aprendizaje no significativo, que sólo era una memorización temporal que el estudiante utilizaba para aprobar el examen. La manera de evaluar el desempeño de los estudiantes del grupo 08 con el que se ensayó esta propuesta de enseñanza ha sido explicado, la evaluación fue continua y los datos para llevarla a cabo eran extraídos de varias fuentes entre las que destacaban: Las participaciones en los debates, los resúmenes de lecturas, los ensayos, las soluciones a los ejercicios, que en esta ocasión eran presentadas por los estudiantes en el seno del grupo, discutidas y analizadas, de manera que evidenciaban el grado de comprensión de los conceptos. Hubo una exploración continua a través de los interrogatorios que, en forma directa se hacían a los estudiantes en las sesiones en el aula y, de importancia capital, fueron las entrevistas personales que realicé con cada uno de los estudiantes, en la búsqueda de sus concepciones previas a los fenómenos físicos que les presentaba.

Las "tareas" que asignaba en cursos anteriores consistían de series de problemas elegidos de manera tal que quien los realizaba, a través de la aplicación repetida de algoritmos de solución, adquiría "destreza" para resolver problemas de orden práctico, sin embargo, al igual que lo que ocurría

con los conceptos, bastaba con dejar pasar dos o tres semanas y al pedirles que opinaran sobre un problema similar a los que habían resuelto, la “destreza” había desaparecido y, lo más desalentador de esta actividad era que sólo algunos alumnos realizaban estos ejercicios (estimo que entre el 5% y el 10%), el resto de los estudiantes copiaban la supuesta solución sin comprensión alguna, sin aportación alguna, generalmente reproduciendo los errores y, por descuido, introduciendo otros. Por otro lado, se da un fenómeno referido a “las tareas”, que consiste en todo un conjunto de estrategias que el estudiante despliega para que esos trabajos escritos sean crípticos, ininteligibles y, de facto, inútiles y difíciles de revisar. Por estas y otras razones, asignar tareas y revisarlas era una actividad inícuca. El cambio operado tanto en los estudiantes del grupo 08 como en el profesor, respecto a las “tareas” fue notable. Los ejercicios dejaron de ser “series de problemas”, surgía la necesidad de abordarlos, durante el desarrollo de cualquier contenido curricular, la mayoría de los ejercicios se pedía que fueran resueltos en grupos pequeños, lo que propiciaba intercambio entre los estudiantes, las soluciones escritas dejaron de tener importancia dado que, por lo general, la solución de los problemas era sometida a la consideración del pleno del grupo, se analizaba, se discutía, se proponían soluciones alternativas y se planteaban, en la mayoría de los casos, variantes de dichos problemas. Sin embargo, fueron asignados numerosos problemas para que los estudiantes resolvieran individualmente, las variantes significativas al respecto consistieron en que no se pedía que los entregaran por escrito para ser revisados, ni tampoco “contabilizaban” para integrar la calificación final del curso; los estudiantes comprendieron que intentar resolver los ejercicios era una actividad que les permitía averiguar sobre su comprensión de los contenidos de la asignatura, que sólo resultaba beneficiado quien intentaba resolverlo y que, en última instancia, hacer o no hacer los ejercicios era su responsabilidad y su ejecución no era sujeta ni a premio ni a castigo vía las calificaciones finales. Se comprobó que los estudiantes abordaban estos problemas porque planteaban dudas sobre su solución en las sesiones en el aula y si esto no ocurría, selectivamente se interrogaba a los estudiantes al respecto.

11.- Para facilitar la construcción tanto personal como colectiva de la teoría electromagnética de Maxwell, invariablemente recurriamos a la historia, fueron revisadas lecturas referentes a Franklin, Gilbert, Coulomb, Faraday, Ampère, Oersted, Newton, Maxwell y otros. Ubicar los problemas, los conceptos y las soluciones a los problemas en el contexto en que surgieron, las divergencias y controversias, permitieron una mejor comprensión de los motivos que llevaron a los científicos a proponer sus teorías, a plantear sus hipótesis. Establecer una conexión entre el pasado y el presente permitió a los estudiantes comprender el origen, la evolución y la interpretación contextual de los conceptos que estábamos estudiando.

12.- El marco teórico de la propuesta de enseñanza y las intenciones educativas guiaron las actividades, los tiempos, el ritmo, las interpretaciones y las decisiones que debieron ser tomadas en el desarrollo del curso. Las actividades, atendiendo al marco teórico de la propuesta, buscaban indagar sobre los preconceptos de los estudiantes en relación con los nuevos contenidos de aprendizaje, se procuró hacer que los contenidos resultaran significativos para los alumnos, que fueran adecuados a su nivel de desarrollo cognitivo y que hubiera balance entre los contenidos conceptuales, procedimentales y actitudinales. Se procuró provocar conflictos cognitivos que promovieran la actividad mental de los estudiantes para establecer las relaciones correctas entre los conocimientos previos y los conceptos nuevos, se privilegiaron las actividades que coadyuvaban a que el estudiante lograra autonomía en sus aprendizajes. Simultáneamente, el marco teórico de la propuesta guió y modificó tanto las actitudes como la actuación del profesor en el desarrollo del curso, en el caso particular de esta propuesta de enseñanza:

a) Los exámenes diagnóstico permitieron conocer el nivel de instrucción previa de los estudiantes del grupo.

b) Las entrevistas personales, los interrogatorios directos en las sesiones de aula, las actuaciones de los estudiantes en los debates, etcétera, proporcionaron información concreta sobre los preconceptos más comunes en los alumnos y por lo tanto, podíamos trabajar alrededor de esas preconcepciones, para lograr la transformación de los conceptos.

c) El estar convencido de la imposibilidad de "transmitir conocimiento" puesto que el conocimiento es una construcción eminentemente individual y mediada socialmente, guió el desarrollo del curso, evitando las exposiciones ilustrativas que invariablemente conducen al profesor y a los alumnos a la representación conocida de "el profesor habla, el estudiante escribe, el profesor cree que enseña, el estudiante aparenta que entiende". En lugar de estas exposiciones, se llevaron a cabo actividades tendientes a facilitar la construcción de los estudiantes. Se privilegiaron las actividades que atribúan al estudiante un papel activo en su realización, que les obligaran a investigar ideas y procesos intelectuales, que les permitieran interactuar con su entorno; a examinar la aparición de un concepto en el pasado, su historia, evolución y el contexto en el que surgió así como examinar dicho concepto en el contexto actual y cuestionarse sobre la validez de su aceptación acritica.

13.- Con respecto a la enseñanza del electromagnetismo en la Facultad de Química de la UNAM, se pueden hacer algunas recomendaciones de orden general pero, antes debo plantear las siguientes consideraciones:

a) El proceso de aprendizaje puede, desde luego hacerse más eficaz y más eficientemente pero, estas consideraciones dependen fuertemente de cuales sean las intenciones educativas de la institución. Es conocido el conflicto que se da en la Facultad de Química con respecto a dos corrientes de pensamiento (que no son las únicas que existen sino las que más adhesiones tienen) cuando se pretende definir con claridad cual es el perfil de egreso deseado para nuestros estudiantes. Algunos miembros prominentes de nuestra comunidad se manifiestan partidarios de que los estudiantes tengan una mayor carga académica en asignaturas que reciben la denominación de "asignaturas de corte profesionalizante", refiriéndose con ello a asignaturas específicas que abordan las técnicas y los procesos que se usan en la actualidad, en el ejercicio de la química y que por lo tanto son los conocimientos que les proporcionan valía en el mercado de trabajo actual. La otra corriente manifiesta que la mayor carga académica debería enfocarse en el conocimiento de las ciencias básicas, con el argumento de que el estudiante que domine estas ciencias, estará capacitado para absorber cualquier proceso o técnica que se esté usando en el momento de su egreso de la Facultad, dotándolo por lo tanto de valía en el mercado de trabajo y dándole además la posibilidad de modificar los procesos, las técnicas, los enfoques e inclusive modificarse así mismo, si esto fuera necesario. Dada esta dicotomía, si aceptáramos la primera corriente, difícilmente se justificaría dedicarle un gran esfuerzo y recursos suficientes a la enseñanza del electromagnetismo y terminariamos, por el contrario, modificando la asignatura para que el estudiante tuviera un conocimiento superficial de la teoría electromagnética, sólo el conocimiento suficiente para poder aplicar las técnicas actuales pero sin la capacidad de entender cabalmente los principios involucrados en el funcionamiento de los dispositivos físicos que utiliza para llevar a cabo sus funciones.

Aceptar las intenciones educativas de la segunda corriente de pensamiento nos llevaría a intentar una modificación sustancial en la enseñanza del electromagnetismo, con el objetivo de lograr una construcción del conocimiento por parte de los estudiantes, que los capacite para entender con

profundidad la teoría electromagnética, capacitarlos para entender el funcionamiento de los dispositivos que emplean para realizar las pruebas propias del área de la Química así como entender las motivaciones para el establecimiento de los procesos y las técnicas actuales y, finalmente, capacitarlos para desarrollar procesos propios y asimilar procedimientos futuros.

Una tercera vía, la menos deseable, que no es una solución al problema que nos ocupa, radica en "conformarnos" con los resultados obtenidos, que a final de cuentas, son aceptables desde la óptica de quien pretende el conocimiento superficial pero que, a mediano plazo, redundaría en detrimento de la calidad de nuestros egresados.

b) Para el mejoramiento de la enseñanza y del aprendizaje del electromagnetismo, se requieren acciones que involucren de manera directa a los planes y programas de estudios, los requisitos de ingreso y permanencia de los estudiantes en las carreras que se ofrecen en la Facultad de Química de la UNAM, los recursos económicos disponibles, las instalaciones físicas y, desde luego, a los profesores que conforman la planta docente de la Facultad. Evidentemente, sólo algunos factores de los mencionados competen a esta propuesta de enseñanza y serán abordados a continuación.

c) Una conclusión respecto a los resultados obtenidos en el proceso de enseñanza-aprendizaje del electromagnetismo que se antoja obvia, es considerar que los estudiantes son la causa de que el proceso no sea exitoso, resulta muy fácil hacerlos responsables debido a que: "no están preparados para cursar la asignatura", "no muestran motivación intrínseca", "no realizan el esfuerzo necesario", etcétera, sin embargo, una vez que la institución los ha aceptado como alumnos, ha reconocido de manera tácita o explícita que dichos estudiantes reúnen los requisitos de ingreso y la misma consideración es aplicable en el caso particular de inscripción a la asignatura electromagnetismo; entonces, si el estudiante carece de la instrucción previa que se considera indispensable para cursar exitosamente la asignatura, el fallo se encuentra en las asignaturas previas o bien en una mala ubicación del electromagnetismo en el mapa curricular. En lo concerniente a la motivación del alumno por aprender la teoría electromagnética, si dicha motivación no existe en su forma intrínseca, denota que nuestros programas de las asignaturas previas y simultáneas, no consideran la importancia que tienen las ciencias básicas, al parecer no se aborda la interdisciplinariedad, el carácter integral en el estudio de las ciencias, que no se tratan desde los enfoques teóricos o experimentales, las actividades integradoras del conocimiento científico. Por otro lado, es cierto que los estudiantes carecen de buenos hábitos de estudio, que en un alto porcentaje, poseen una instrucción previa defectuosa, que carecen en muchas ocasiones de conocimientos considerados básicos y que una componente fuerte de la idiosincrasia del estudiante promedio se manifiesta mediante un conjunto de prácticas poco éticas que los llevan a intentar aprobar el curso sin estudiar, estar presentes sin participar, copiar los trabajos extraclase asignados, copiar durante los exámenes, etcétera. Sin embargo, buena parte de estos impedimentos para el desarrollo adecuado de un curso, fueron superados mediante la aplicación de la propuesta de enseñanza motivo de esta tesis y las medidas adoptadas para los aspectos que se pudieron solucionar, ya han sido reseñadas. Existe desde luego, un conjunto de acciones que puede tomar la institución y que se refieren fundamentalmente a las modificaciones a los planes y programas de estudios, a los recursos económicos y humanos que destinen para el efecto, a la reglamentación que regule el ingreso y permanencia de los estudiantes en la institución, a las intenciones educativas y en general, a las dimensiones sociales de la educación.

d) El otro componente fundamental del proceso de enseñanza-aprendizaje es el profesor y, por razones obvias, este estudio no incluye datos al respecto. Los datos que pueden ser considerados, son los que la propia institución proporciona: La mayoría de los profesores posee una preparación

sólida en el campo propio del conocimiento, la experiencia docente promedio es alta, el cumplimiento de los profesores en lo que respecta a asistencia y puntualidad en sus cursos es bueno, sin embargo, existen algunas condiciones laborales que, a mi juicio, impiden que el proceso de enseñanza-aprendizaje sea lo exitoso que pudiera ser, entre estos problemas cito: Los sueldos de los profesores, que son manifiestamente bajos, lo que los obliga a prodigarse en las actividades que premian económicamente los "programas de estímulos" (y la docencia no es una de estas actividades). Otra variante de este aspecto la constituye el hecho de que la mayoría de los profesores están contratados bajo el régimen de profesor de asignatura, que retribuye exclusivamente el tiempo frente al grupo (y no de manera generosa), obligando al profesor a contratarse en varias instituciones, lo que limita el tiempo que puede dedicar, fuera del aula, a sus grupos, así como a asistir a los cursos, seminarios, congresos, y en general, a las actividades académicas que enriquecen su formación docente. Este es un problema que atañe a toda la educación pública en el país y sólo podrá ser resuelto con acciones que tome el gobierno federal.

A N E X O S

**PAGINACIÓN
DISCONTINUA**

BIBLIOGRAFÍA GENERAL

- Aebli, H. Doce formas básicas de enseñar: Una didáctica basada en la psicología. Madrid, Narcea, 1988.
- Andrés, M. Evaluación de un plan instruccional dirigido hacia la evolución de las concepciones de los estudiantes acerca de circuitos eléctricos. Enseñanza de las Ciencias. 1990. 8(3), 231-237.
- Arons, A. Evolución de los Conceptos de la Física. Trillas. México. 1970.
- Ausubel, D., Educational Psychology. Holt Rinehart & Winston. New York. 1978
- Ausubel, D. Novak, J. & Hanesian H. Psicología Educativa: Un punto de vista cognoscitivo. Trillas. México. 1998
- Bachelard, G. La formación del Espíritu Científico. Siglo XXI. México. 2000
- Bacon, F. Novum Organum. Editado por Urbach and Gibson. London. 1993.
- Bacon, F. Del Adelanto y Progreso de la Ciencia Divina y Humana. Juan Pablos Editor. México 1984.
- Bar, V, Zinn, B. y Rubin, E. Children's ideas about action at a distance. International Journal of Science Education 1997 19(10), 1137-1157.
- Berkeley Physics Course and Laboratory. MacGraw Hill Co. USA. 1968.
- Berkson, W. Las Teorías de los Campos de Fuerza. Alianza Universidad, Madrid. 1985.
- Borges, A y Gilbert, J. (1998) Models of magnetism. International Journal of Science Education 20(3) 361-378.
- Borges, A y Gilbert, J. Mental Models of electricity. (1999). International Journal of Science Education 21(1)95-117.
- Cabrera, J. Introducción a la Física Teórica. Vol. II. Librería General. España. 1958.
- Carretero, M. Constructivismo y Educación. Aique Argentina. 1993
- Castorina, J. Y otros, Piaget en la Educación. Paidós Educador. México. 1999.
- Conant, J. (editor) The development of the concept of electric charge. Harvard case histories in experimental science. Cambridge : Harvard University, 1957.
- Chateau, J. Los Grandes Pedagogos. Fondo de Cultura Económica. México. 2000.
- Chomsky, N y Piaget, J. La Psicogénesis del conocimiento y su significado epistemológico. Buenos Aires Editor. Argentina. 1979.
- Coll, C. Psicología Genética y Educación. Oikos-Tau. Barcelona. 1981.
- Coll, C., Psicología y Curriculum. Paidós. Barcelona. 1988
- Coll, C. El Constructivismo en el Aula. Grao. España. 1999.
- Coll, C. ¿Qué es el Constructivismo? Colección Magisterio Uno. Argentina. 1997
- Coll, C. La teoría genética y los procesos de construcción del conocimiento en el aula. Paidós Educador. México. 1999
- Colombo de Cudmani, L y Fontdevila, P. Concepciones previas en el aprendizaje significativo del electromagnetismo. Enseñanza de las Ciencias 1990. 8(3), 215-222
- Conant, J. (editor) The development of the concept of electric charge. Harvard case histories in experimental science. Cambridge : Harvard University, 1957.
- De Posada, J. (1997). Conceptions of high school students concerning the internal structure of metals and their electric conduction: Structure and evolution. Science Education. 81(4) 445-467
- Díaz Barriga, F. y Hernández, J. Estrategias Docentes para un Aprendizaje Significativo. Mac Graw Hill. México. 1999.
- Díaz Barriga, A. y otros. Efectos de la Política de Modernización Educativa en la Educación Superior en México. Problemáticas y Críticas. En "La Identidad en la Educación Superior en México", Coordinador Guillermo Villaseñor. Educación Superior Contemporánea. México. 1997
- Domínguez, R. Curso elemental de física. Porrúa. México. 1961

- Driver, R, Guesne, E. Y Tiberghien, A. *Ideas Científicas en la Infancia y la adolescencia*. Morata. Madrid. 1989.
- Durkheim, E. *Las reglas del método sociológico*. Pléyade. Buenos Aires. 1976
- Einstein, A. and Infeld, *The Evolution of Modern Physics*. Simon and Schuster. New York. 1938.
- Einstein, A. *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*. Altaya. Madrid. 1998.
- Elliott, J. *La Investigación-acción en educación*. Morata. Madrid. 1997.
- Faraday, M. *Experimental Researches in Electricity*. Dover. New York. 1965
- Fermi, L. Y Bernardini, G. *¿Qué ha dicho verdaderamente Galileo?*. Doncel. Madrid. 1971.
- Flores, F. *Epistemología y Enseñanza de la Ciencia*. D.E.C. Centro de Instrumentos. UNAM. México. 1994.
- Flores, F. Y Gallegos, L. *Enseñanza de las Ciencias y la Historia*. Perfiles Educativos. Oct-dic.1993, No. 62. UNAM. México.
- Flores, F. y Gallegos, L. *Consideraciones sobre la estructura de las teorías científicas y la enseñanza de la ciencia*. Perfiles Educativos No. 61. 1993. UNAM. México.
- Flores, F. *La enseñanza de las Ciencias: Su Investigación y sus Enfoques*. Ethos Educativo. México 2000
- Fosnot, C. *Constructivism: Theory, Perspectives and Practice*. Hardcover. New York. 1996.
- Gagné, E. *La Psicología Cognitiva del Aprendizaje Escolar*. Visor. Madrid. 1991
- Gago, A. *Elaboración de Cartas Descriptivas, Guía para preparar el programa de un curso*. Trillas. México. 1978.
- Gallegos, L. *Comparación entre la evolución de los conceptos históricos y las ideas de los estudiantes*. Tesis Doctoral. UNAM. México, 2002.
- Gerrish, H. *Fundamentos de Electricidad*. Limusa. México. 1984.
- Giancolli, D. *Física General Vol. II*. Prentice Hall Hispanoamericana. S. A. México. 1988.
- Gilbert, W. *De Magnete*. Dover. New York. 1958.
- Giordán, A. *Los Nuevos Modelos de Aprendizaje*. Educación 2001. N° 25 México. 1997.
- Giordán, A. Y Vecchi, G. *Los Orígenes del Saber: De las Concepciones Personales a los Conceptos Científicos*. Diada. Madrid. 1988.
- Goowin, D. *Educating*. Cornel University Press. New York 1981.
- Greca, I y Moreira, M. *Modelos mentales y aprendizaje de física en electricidad y magnetismo*. Enseñanza de las Ciencias 1998. 16(2), 289-303.
- Guisasola, J. y Furió, C. *Dificultades en el aprendizaje del concepto campo eléctrico*. Investigación en la Escuela (1994/23) 103-114.
- Guisasola, J. y Furió, C. *Difficulties in learning the concept of electric field* Science Education 82(4) 511-526.
- Harman, P. *Energy, Force & Matter: The Conceptual Development of Nineteen Century Physics*. Cambridge University Press. 1996.
- Hetch, E. *Física en Perspectiva*. Addison Wesley Iberoamericana. México. 1987
- Higelé, P. *Una experiencia de aprendizaje de las operaciones intelectuales*. Educación permanente, (vi/81, N58)
- Holton, G. *"Resource Letter SRT-1 On Special Relativity Theory"* Am. Jour. Phys. 30, 462 (1962)
- Huerta, J. *La Clasificación de los Objetivos de Aprendizaje. Su función y Utilidad*. Trillas. México. 1978.
- Humboldt, A. *Cosmos: A sketch of the physical description of the universe*. The Jons Hopkins University Press. London. 1997
- Ibarra, C. E. *La Universidad ante el espejo de la excelencia*. Enjuegos Organizacionales, UAM Iztapalapa, México. 1993.
- Illych, I. *Deschholling Society*. Traducido y Publicado por CIDOC, México. 1971.

- Jean, J. *The Mathematical Theory of Electricity and Magnetism*. The Syndics of the Cambridge University Press. London. 1966
- Kemp, J. *Planeamiento Didáctico*. Diana. México. 1972.
- Khun, T. *La Estructura de las Revoluciones Científicas*. F.C.E. México. 1971.
- Le Goff, J., *Los Intelectuales en la Edad Media*. Gedisa, Buenos Aires. 1985.
- Lee, Y., Law, N. (2001). *Exploration in promoting conceptual change in electrical concepts via ontological category shift*. International Journal of Science Education 23(2) 111-149.
- Lorentz, H.A., *Las Théorie Electromagnétique de Maxwell et son Application aux corp Mouvants*. Collected Papers.
- Mason, E. *A History of the Sciences*. Abelard-Shuman. USA. 1962.
- Matthews, M. *Historia y Epistemología de las Ciencias: La Aproximación Actual*. Enseñanza de las Ciencias. 1994, 12(2)
- Maxwell, J. *A Treatise on Electricity and Magnetism. Vol. I*. Dover. New York. 1954.
- Maxwell, J. *A Treatise on Electricity and Magnetism. Vol. II*. Dover. New York. 1954.
- Maxwell, J. *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell. Vol. I*. Dover. N.Y. 1965.
- Morse, P. And Feschbach, *Methods of Theoretical Physics*. Mac Graw Hill. N.Y. 1953
- Nardi, F. *Campo de Forca: Subsídios Históricas e Psicogenéticos para a Construção do Ensino desse conceito*. Universidade de Sao Paulo. 1991.
- Neill, A. *Freedom-Not License*. Hart Publishing Co. New York. 1966.
- Neill, A., *Summerhill: A Radical Approach to Education*. Penguin. London. 1968.
- Nersessian, N. *Faraday to Einstein: Constructing Meaning in Scientific Theories* Martinus Nijhoff Publishers. Boston USA. 1984
- Nersessian, N. *How Do Scientist Think?: Capturing the Dynamics of Conceptual Changes in Science*. En Giere R. (ed) Cognitive Models of Science. Minnesota Studies in the Philosophy of Science Vol XV. University of Minnesota Press. Cambridge. 93-131. USA. 1999
- Newman, D. Y otros *La Zona de Construcción del Conocimiento*. Morata. Madrid. 1991
- Newman, J. *James Clerk Maxwell*, Scientific American. Jun. 1955.
- Newton, I. *Principios Matemáticos de la Filosofía Natural y su Sistema del Mundo*. Editora Nacional. Madrid. 1982.
- Nola, R. *Constructivism in Science and Science Education: A Phylosophycal Critique* Science and Education. 6, 55-83. 1997.
- Novak, J. *A theory of Education*. Cornell University Press. U. A. 1977.
- Nuffield Foundation. Longmans/Penguin Books. London 1967.
- Oersted, H., *Scientific Papers*. Copenhagen 1920
- Onrubia, J. *Enseñar: Crear Zonas de Desarrollo Próximo e Intervenir en Ellas*. Grao. Barcelona. 1999.
- Papp, D. *Historia de la Física*. Espasa Calpe. Madrid. 1961
- Pérez, G. *Diez años de investigación en didáctica de las ciencias: Realizaciones y Perspectivas*. Enseñanza de las Ciencias. Universidad de Valencia. España. 1994 .
- Physical Science Study Comitee. D.C. Heat and Company. Lexinton, Mass. 1971.
- Piaget, J. *El Estructuralismo*. Oikos-Tau. Barcelona. 1980.
- Piaget, J. *Estudios de Psicología Genética*. Emecé Editores. Argentina. 1997
- Piaget, J. *Psicología y Pedagogía*. Ariel. México. 1999.
- Piaget, J. *El Nacimiento de la Inteligencia en el Niño*. Aguilar. Madrid. 1969.
- Piaget, J. *Biología y Conocimiento*. Siglo XXI. México. 1969.
- Piaget, J. e Inhelder, B. *Psicología del Niño*. Buenos Aires Editor. Argentina. 1974.
- Plato, *Protágoras and Meno*. Penguin Harmondsworth. London. 1956.
- Pozo, J. *Teorías Cognitivas del Aprendizaje*. Morata. Madrid. 199 .
- Reitz, J & Mildford, F. *Foundation of Electromagnetic Theory*. Addison Wesley. USA. 1960.
- Resnick, L. *Education and Learning to Think*. National Academy Press. Washington. USA. 1987.

- Resnick, R., Halliday, D. y Krane, *Física Vol II*. Ccsa. México. 1992.
- Ruiz, A., Rosado, L. y Oliva, J. *Investigación de las ideas de los alumnos de enseñanza secundaria sobre la corriente eléctrica*. Enseñanza de las Ciencias 9(2) 155-162.
- Shamos, M. *Great Experiments in Physics*. Holt, Rinehart and Winston. USA. 1959.
- Sienko, M. y Plane, R. *Química*. Aguilar. México. 1978.
- Skygger, B. *Walden Two*. Mac Millan. New York. 1948.
- Skygger, B. *Science and Human Behaviour*. Mac Millan. New York. 1953
- Skygger, B. *Más Allá de la Libertad y de la Dignidad*. Fontanella. Barcelona. 1971.
- Solé, I. *Los Profesores y la Concepción Constructivista*. Grao. Barcelona. 1999.
- Sommerfeld, A. *Electrodynamics: Lectures on Theoretical Physics. Vol III*. Academic Press. USA. 1952
- Stocklmayer, S., y Treagust, D (1996). *Images of electricity: how do novices and experts model electric current?* International Journal of Science Education 18(2) , 163-178
- Thacker, B., Ganiel, U. y Boys, D., (1999) *Macroscopic phenomena and microscopic processes: Student understanding of transient in direct current electric circuits*. American Journal of Physics 67 (suppl.7) 25-31 .
- Thorndike, E. *Animal Intelligence: Experimental Studies*. Mac Millan New York. 1911.
- Tipler, P. *Física Vol.II*. Reverté. Barcelona. 1993
- Tobin, K. and Tippins, D. *Constructivism as a referent for teaching and learning*. Laurence Erlbaum Associates, Publishers. Hillsdale. N.J. 1993
- Vienot, L y Rainson, S. *Student's reasoning about the superposition of electric fields* (1992) International Journal of Science Education. 14(4) 475-487.
- Von Glasersfeld E. *A Constructivism in Education: Constructivist Approach To Teaching* Steffe & Gale Eds.. Laurence Erlbaum Associates Publishers. Hillsdale N.J. 3-16. USA 1995.
- Vygotsky, L. *El Desarrollo de los Procesos Psicológicos Superiores*. Grijalbo. Madrid. 1979.
- Vygotsky, L. *Pensamiento y Lenguaje*. Pléyade. Buenos Aires. 1985.
- Vygotsky, L. *La Educación y las Formas Superiores de Conducta*. Visor. Madrid. 1995.
- Weber, M. *Ensayos de Sociología Contemporánea*. Martínez Roca. España. 1972.
- Wheatley, G.H. *Constructivist perspectives on Science and Mathematics Learning*. Science Education 75(1).1991
- Whittaker, E. *History of the theories of Aether and Electricity*. Arper Torchbooks. New York. 1960.
- Zaki, C. *Tecnología de la Educación*. Ccsa. México. 1977.

James Clerk Maxwell. Rasgos biográficos.

Maxwell nació en el seno de una familia acomodada en Edinburgo, Escocia, el 13 de junio de 1831, cuando Michael Faraday¹ estaba inmerso en sus trabajos que a la postre serían sus más importantes aportaciones a la ciencia. Nació unos años antes de que Lenz² estableciera el principio de inducción eléctrica.

Maxwell creció en un periodo en el que hubo un gran avance en las ciencias físicas, hubo progresos notables en electricidad, termodinámica, teoría cinética y en esa época se hizo la primera formulación clara del principio de conservación de la energía, lograda por Helmholtz³.

Desde su infancia y hasta los diez años, Maxwell fue instruido de manera particular (en su casa), se le consideró un niño inteligente, agudo, pero no precoz. A la edad de diez años, entró a estudiar en la Academia de Edinburgo, en la cual pronto mostró tener un talento extraordinario para las matemáticas (y para escribir poesía). Cursó seis años la Academia y posteriormente, pasó tres años en la Universidad de Edinburgo, de la cual egresó, para irse a Cambridge, Inglaterra, en donde fue aceptado como estudiante en el Trinity College y recibió su grado con altos honores en el año de 1854, permaneció en Cambridge, otros dos años estudiando los trabajos de Faraday y desarrollando los propios, relacionados con matemáticas, óptica geométrica y una teoría del color. En el año de 1856 fue elegido como profesor asociado de filosofía natural en el Marischal College, donde completó la primera de sus contribuciones notables a la matemática física, que consistió en publicar un ensayo, que contenía una solución, que explicaba la estabilidad de los anillos de Saturno y que mereció el premio "Adams"⁴. Simultáneamente, estuvo interesado en la teoría cinética de los gases, en la cual propone una solución al problema de determinar las velocidades de las moléculas de un gas. Su solución es ahora conocida como la "distribución maxwelliana".

En 1860 es nombrado Profesor titular de filosofía natural en el King's College en Londres, en donde pasó por el periodo más fructífero de su carrera ya que en cinco años, aproximadamente, completó su trabajo sobre la teoría del color, hizo algunas aportaciones a la teoría cinética de los gases, estableció una relación funcional para la viscosidad del aire en función de la temperatura y presión y escribió su teoría sobre electricidad y magnetismo⁵. En el año de 1866 publica su escrito sobre "Teoría Dinámica de Gases", en donde hace algunas correcciones a los trabajos publicados por Clausius⁶. Los trabajos realizados por Maxwell fueron tanto teóricos como experimentales, particularmente se interesó en la experimentación, en sus trabajos relacionados con la viscosidad del aire, formó un equipo de trabajo con Jenkin y Stewart para determinar el valor del "Ohm" como una medida absoluta.

Renuncia, en 1865, a su cátedra como profesor del King's College, para dedicarse, de tiempo completo, a sus investigaciones (y a su poesía). En 1871 la Universidad de Cambridge otorgó a Maxwell la cátedra de profesor de física experimental y simultáneamente lo nombró director del recién creado "Laboratorio Cavendish", mismo que fue dirigido en su construcción y equipamiento, por el propio Maxwell. El laboratorio fue abierto oficialmente en el año de 1874 y rápidamente se convirtió en el centro de investigación física más avanzado de su época.

¹ Michael Faraday (1791-1867)

² Heinrich Lenz (1804-1865)

³ Hermann Von Helmholtz (1821-1894)

⁴ El premio Adams se estableció en 1848 para premiar, periódicamente, las mejores soluciones a algunos problemas de importancia física, propuestos por el comité de evaluación.

⁵ Esta teoría fue publicada hasta el año de 1873. "A treatise on electricity and magnetism. 1873".

⁶ Rudolph Clausius (1822-1888)

Maxwell se dedicó a la tarea de revisar, editar y publicar los trabajos realizados por Cavendish⁷.

Desde diversos puntos de vista, el trabajo más importante de Maxwell fue su teoría del campo electromagnético. En este trabajo incluye "todo" lo conocido en ese entonces, relacionado con los fenómenos luminosos, eléctricos y magnéticos. Formuló la estructura matemática, predijo la existencia de las ondas electromagnéticas capaces de propagarse en un medio dieléctrico, que poco tiempo después fueron producidas por Hertz⁸.

Las ecuaciones derivadas por Maxwell proporcionan una relación cuantitativa entre los campos eléctricos y magnéticos, entre las cargas y corrientes eléctricas, así como la relación entre los campos y las corrientes variables en el tiempo. Estas ecuaciones contienen los postulados de Coulomb⁹ (interacción entre cargas), el descubrimiento hecho por Oersted¹⁰ del efecto magnético de una corriente eléctrica, el trabajo de Ampere¹¹ sobre electrodinámica, la Ley de Ohm¹² que establece la relación entre la corriente eléctrica en un conductor y la diferencia de potencial entre los extremos del conductor, la Ley de Faraday de la inducción electromagnética y la Ley de Lenz. Incluye Maxwell en su trabajo, la hipótesis de que las ondas electromagnéticas proceden de corrientes eléctricas oscilantes y que pueden, además viajar en el espacio vacío, con la rapidez de la luz. Con estas ecuaciones podemos, dados inicialmente los valores de las fuerzas eléctricas y magnéticas, en cualquier punto, describir su comportamiento en el tiempo y podemos determinar la rapidez de la luz a partir de medidas de cantidades eléctricas y magnéticas.

La teoría de Maxwell asume la continuidad de la corriente eléctrica (las corrientes fluyen en circuitos cerrados), introduce la idea de que la energía reside en el campo electromagnético y no sólo en el conductor; establece la identidad entre el "éter luminífero"¹³ y el campo electromagnético, concluyendo por lo consiguiente, que la luz es un fenómeno electromagnético e introduce, el concepto de "corriente de desplazamiento"¹⁴.

Entre las mayores contribuciones a la teoría física, podemos destacar las realizadas por Newton¹⁵ en el siglo XVII y la de Maxwell, en el siglo XIX, ambas teorías sintetizan grandes cuerpos de conocimientos.

Newton publica en 1687 su obra cumbre conocida como los principia¹⁶, en la cual unifica, en términos de unas pocas leyes, todo lo que se conocía sobre dinámica, excepto el comportamiento de los cuerpos que se mueven a altas velocidades (cercanas a la velocidad de la luz en el vacío), el cual fue explicado con posterioridad por Einstein¹⁷.

⁷ J.C. Maxwell "The electrical researches of the Hon. Henry Cavendish. Cambridge, Eng.: Cambridge University, 1879.

⁸ Heinrich Hertz (1857-1894)

⁹ Charles Augustin Coulomb. (1736-1806)

¹⁰ Hans Christian Oersted. (1777-1851)

¹¹ André Marie Ampere. (1775-1836)

¹² George Simon Ohm (1789-1854)

¹³ El éter luminífero era el medio en el que se suponía que se propagaba la luz.

¹⁴ Cuando la carga fluye a través de un medio, surge una corriente adicional a la que representa el movimiento de las cargas y es interpretada como un "desplazamiento" del medio que se manifiesta como fuerzas eléctricas y magnéticas.

¹⁵ Sir Isaac Newton (1642-1727)

¹⁶ Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica. Una traducción al inglés. Newton, I. Mathematical Principles of Natural Philosophy and His System of the World. Trans. A. Motte. Berkeley University of California. 1947. USA.

¹⁷ Albert Einstein (1879-1955)

En 1873, Maxwell publica, también, su obra cumbre, “A treatise on electricity and magnetism”, en ella resume los conocimientos sobre la naturaleza de la luz y fenómenos tanto electrostáticos como magnetostáticos, observados por Franklin¹⁸, Gilbert¹⁹, Oersted, Faraday, Ampere y otros.

A edad temprana (48 años), Maxwell muere en el año de 1879.

¹⁸ Benjamin Franklin(..)
¹⁹ Gilbert

ANEXO NÚMERO 1 "PROGRAMA OFICIAL"

Nombre de la Asignatura:

ELECTROMAGNETISMO

CREDITOS: 10

Introducción.

El estudiante requiere un conocimiento amplio del electromagnetismo, desde conceptos básicos, leyes y definiciones (en los cursos de mayor orientación teórica como los de Estructura de la Materia y los de Físicoquímica), hasta aplicaciones técnicas en el laboratorio químico (instrumentos, etcétera) o en la vida cotidiana. Por lo tanto el curso tiene un doble objetivo: por un lado, dar, definiciones básicas y leyes físicas, y por el otro, dar conocimiento de una gran variedad de fenómenos electromagnéticos y sus aplicaciones.

Como se trata de un curso de solamente un semestre y debe cubrir un gran número de temas, debe mantenerse a un nivel esencialmente descriptivo. El estudiante promedio que toma el curso tendrá una preparación matemática relativamente limitada; por esta razón el formalismo matemático se debe mantener en un mínimo, lamentablemente. Esto impide alcanzar algo del rigor deseable en la presentación; por ejemplo, un tratamiento general y conciso del campo electromagnético en forma unificada requiere de un uso extensivo de métodos de análisis vectorial, que no puede considerarse en este caso.

Sin embargo, una falta de rigor y elegancia matemáticos no significa que deban omitirse los principios físicos generales. De hecho, la enseñanza de la física debe proporcionar al alumno técnicas generales de pensamiento científico, mostrarle idealizaciones y aproximaciones útiles, y ejemplificar la matematización de la experiencia característica de las ciencias contemporáneas. En este curso deben enfatizarse así principios de conservación (por ejemplo la energía electromagnética solo es una forma de energía que puede convertirse en otras, con una obvia implicación en electroquímica), e insistir en que la mayoría de las interacciones que se observan tanto a nivel macroscópico como a nivel atómico son esencialmente de origen electrostático.

Para evita confusiones innecesarias en un curso tan corto debe utilizarse un único sistema de unidades, el SI.

El profesor deberá mantener el nivel del curso en el texto recomendado para el alumno, con el objeto de cubrir todas las unidades, y necesitara corregirlo y reforzarlo en algunos temas con la bibliografía sugerida para el maestro; esta se propone al alumno como complementaria.

Objetivos generales de aprendizaje.

Al finalizar el curso, los alumnos:

- Comprenderán los conceptos fundamentales del electromagnetismo.
- Relacionaran los cursos previos de Física (Cinemática y dinámica) y otras materias (Físicoquímica), principalmente con respecto a los conceptos de trabajo y energía.
- Comprenderán los fundamentos del diseño de algunos aparatos simples.
- Realizaran mediciones electromagnéticas básicas (diferencias de potencial, corriente, etcétera).

- Construirán circuitos eléctricos básicos, particularmente de corriente directa.

UNIDAD 1. CARGA ELECTRICA y CAMPO ELECTRICO

(8 h.)

Objetivos;

Al finalizar esta unidad, los alumnos:

- Conocerán los fundamentos experimentales, del concepto de carga eléctrica; la interacción electrostática entre cargas en reposo o con movimiento a baja velocidad, y la formulación de la ley de Coulomb; la importancia de la interacción electrostática en la materia; las similitudes y diferencias entre las interacciones electrostáticas y gravitacional; el campo eléctrico.
- Calcularan la fuerza de interacción entre cargas eléctricas y entre distribuciones de carga sencillas.
- Construirán el campo eléctrico generado por distribuciones de carga sencillas.
- Describirán su efecto sobre cargas de prueba.

Contenido.

Carga eléctrica. Unidades. Cuantización de la carga. Conservación de la carga. Ley de Coulomb. El campo eléctrico. Unidades. Campo eléctrico de una carga puntual. Adición vectorial de campos eléctricos. Campo eléctrico de algunas distribuciones de carga sencillas.

UNIDAD 2. CARGA ELECTRICA y TRABAJO. POTENCIAL ELECTROSTATICO

(6 h.)

Objetivos;

Al finalizar esta unidad, los alumnos:

- Extenderán los conceptos de trabajo y energía a la electrostática.
- Calcularan el trabajo involucrado en el movimiento de una carga en un campo eléctrico, y en la construcción de una distribución de carga.
- Relacionaran el potencial electrostático con la energía potencial.
- Calcularan potenciales electrostáticos

Contenido.

Potencial electrostático. Unidades. Relación entre el campo y el potencial electrostáticos. Adición escalar de potenciales.

UNIDAD 3. DIELECTRICOS y CONDUCTORES

(3 h.)

Objetivos;

Al finalizar esta unidad, los alumnos:

- Clasificarán los materiales de acuerdo a sus propiedades eléctricas y relacionarán estas con la estructura atómica.
- Calcularán campos eléctricos en conductores.

Contenido.

El efecto de un campo eléctrico externo sobre la estructura electrónica de la materia. Constante dieléctrica. Conductores metálicos. Otros tipos de conductores.

UNIDAD 4. CAPACITANCIA

(3 h.)

Objetivos;

Al finalizar esta unidad, los alumnos:

- Calcularán el trabajo necesario para cargar un conductor y un condensador.
- Describirán el efecto de introducir un dieléctrico en un condensador.
- Calcularán la energía almacenada en un condensador.

Contenido.

Capacitancia de un conductor. Unidades. El condensador (capacitor).

UNIDAD 5. CORRIENTES ESTACIONARIAS y CIRCUITOS .

(12 h.)

Objetivos;

Al finalizar esta unidad, los alumnos :

- Describirán la corriente eléctrica como flujo de carga y relacionaran la resistividad y la conductancia con la estructura atómica.
- Utilizaran la ley de Ohm en cálculos sencillos.
- Conocerán el efecto Joule y describirán en un resistor, la potencia y la conservación de energía.
- Resolverán circuitos simples con fem y resistencias usando las leyes de Kirchoff.

Contenido.

Corriente eléctrica (directa). Resistencia, resistividad y conductividad. Unidades. La ley de Ohm. El efecto Joule. Potencia. Unidades. Fuerza electromotriz. Conservación de la energía. Leyes de Kirchhoff. Circuitos.

UNIDAD 6. IMANES PERMANENTES y CAMPO MAGNETICO (6 h.)

Objetivos;

Al finalizar esta unidad, los alumnos:

- Describirán la interacción entre imanes permanentes empleando el campo magnético.

Contenido.

Imanes permanentes. Polos magnéticos. El campo magnético. Unidades. Magnetismo terrestre.

UNIDAD 7. CAMPOS MAGNETICOS ESTACIONARIOS Y CORRIENTES. ELECTRICAS (6 h.)

Objetivos;

Al finalizar esta unidad, los alumnos:

- Calcularan la fuerza de un campo magnético sobre una carga en movimiento y sobre un conductor que soporta una corriente estacionaria.
- Calcularan el campo magnético debido a una corriente estacionaria, la interacción entre dos corrientes y el momento magnético de una espira de corriente.

Contenido.

Fuerza sobre una carga en un campo magnético. Corrientes y campos magnéticos. Ley de Biot-Savart. Momento magnético.

UNIDAD 8. INDUCCION ELECTROMAGNETICA

(6 h.)

Objetivos;

Al finalizar esta unidad, los alumnos:

- Calcularan flujos de campos eléctricos y magnéticos.
- Observaran la fem inducida por la variación de un campo magnético.
- Emplearan la ley de Faraday-Henry-Lenz e interpretaran los fenómenos correspondientes en términos del principio de energía.
- Describirán el movimiento de un conductor en un campo magnético y la inducción de una fem, y el problema inverso, la generación de un campo magnético por la variación de un campo eléctrico, aplicando la ley de Ampere y Maxwell.

Contenido.

Flujo eléctrico y magnético. Ley de Faraday-Henry-Lenz. Inducción y autoinducción. Fem. Concepto unificado del campo electromagnético.

UNIDAD 9. CORRIENTE ALTERNA

(6. h.)

Objetivos;

Al finalizar esta unidad, los alumnos:

- Conocerán la naturaleza de la corriente alterna y la diferencia entre amplitud y promedio de voltaje y de corriente.
- Calcularan potencias en circuitos, C.A.
- Compararan la transmisión de potencia en circuitos CD y CA.
- Resolverán circuitos CA sencillos.

Contenido.

Variación senoidal de voltaje y corriente. Frecuencia. Fase. Potencia. Transformación de voltajes.

UNIDAD 10. APLICACIONES

(8 hrs.)

Objetivos;

Al finalizar esta unidad, los alumnos:

Discutirán algunas aplicaciones técnicas que se habrán presentado parcialmente como ejemplos en las unidades anteriores, enfatizando los principios generales del equipo más comúnmente empleado por el químico.

Contenido.

Fuentes de potencia. Instrumentos de medición de voltaje y de corriente. Elementos de calentamiento. Circuitos para mediciones especiales. Motores. Generadores. Rectificadores. Reguladores de voltaje. Transformadores, etcétera.

Bibliografía.

Para el alumno: ALONSO M, y ROJO O. "Física, tomo. II, Campos y Ondas", Fondo Educativo Interamericano S.A. México. 19.81

Complementario para el maestro: HALLIDAY D. y RESNICK, R. "Fundamentos de Física" C.E.C.S.A., México 1978.

Metodología de la enseñanza.

- * Exposición oral
- * Prácticas de laboratorio
- * Seminarios

Evaluación.

Exámenes parciales. Problemas de tarea. Participación en clase. Laboratorio. Examen final.

Requisitos para llevar el curso.

Para que la comprensión del curso sea adecuado se cree necesario que los alumnos lleven como requisitos, Cálculo de función de una variable, cinemática y dinámica.

ANEXO NÚMERO 2

Laboratorio de Electromagnetismo

Lista de prácticas

- 1.- Electrostática, campo y potencial eléctrico.
- 2.- Medidas de resistencia.
- 3.- Medidas de corriente.
- 4.- Medidas de Voltaje.
- 5.- Ley de Ohm.
- 6.- Leyes de Kirchhoff.
- 7.- Circuito RC.
- 8.- Osciloscopio
- 9.- Circuito RL.
- 10.- Circuito RCL.
- 11.- Ley de Inducción de Faraday.
- 12.- Magnetómetro.