

EL CONCEPTO DE ONDA ELECTROMAGNÉTICA Y SU MEDIO DE
PROPAGACIÓN A PARTIR DE LA TEORÍA DE MAXWELL Y LOS
TRABAJOS DE HERTZ

Trabajo de grado presentado para optar
al título de licenciada en física

Ana Consuelo Segura López

Director: Juan Carlos Castillo Ayala

Línea de investigación: la enseñanza de la física y la relación
física matemática

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL DE COLOMBIA

DEPARTAMENTO DE FÍSICA

SANTAFÉ DE BOGOTÁ

Febrero del 2015

Agradecimientos

Agradezco a todas las personas que me apoyaron e hicieron parte de este proceso: a mi familia, amigos, compañeros y a mi asesor que me ha orientado, apoyado y corregido en mi labor como licenciada en física y por tenerme paciencia.

*El electromagnetismo de Maxwell abrió las puertas a todo mundo
desconocido para los físicos de la época...*

RESUMEN ANALÍTICO EN EDUCACIÓN-RAE

1. Información General	
Tipo de documento	Trabajo de grado
Acceso al documento	Universidad Pedagógica Nacional. Biblioteca Central
Título del documento	EL CONCEPTO DE ONDA ELECTROMAGNÉTICA Y SU MEDIO DE PROPAGACIÓN A PARTIR DE LA TEORÍA DE MAXWELL Y LOS TRABAJOS DE HERTZ
Autor	Ana Consuelo Segura López
Director	Juan Carlos Castillo Ayala
Publicación	Bogotá, Universidad Pedagógica Nacional, 2015, p.77
Unidad Patrocinante	Universidad Pedagógica Nacional
Palabras Claves	Onda electromagnética, movimiento ondulatorio, medio de propagación, recontextualización de saberes

2. Descripción
<p>El trabajo parte o consiste de un análisis detallado de la onda electromagnética y su medio de propagación; por ende se realiza una búsqueda cronológica para el estudio de ella, basándonos en la teoría en el libro de las OEM de Heinrich Hertz quien realizó una serie de experimentos buscando o comprobando la polarización de los materiales dieléctricos, que de alguna manera le permitieron llegar a la comprobación de la existencia de la OEM. Por otro lado también se involucra un estudio de la ley (inducción) de Faraday quien lleva a Maxwell a la formulación matemática de la predicción de dicha onda electromagnética y su medio de propagación que se consideraba como un aislante (dieléctrico).</p> <p>Al describir y analizar cada uno de los experimentos que realizó Hertz, nos da cuenta del proceso con detalle, para llegar al concepto como tal de la OEM y su medio de propagación. Se analiza el concepto de onda, onda mecánica, movimiento ondulatorio y sus ecuaciones; los cuales permiten tener una idea clara de estos fenómenos. Por ende están relacionados con las oscilaciones de un campo eléctrico y magnético, y además se llega a saber cuál es la diferencia y analogía de la onda mecánica y onda electromagnética, y por qué la onda mecánica requiere de medio material con unas ciertas características y propiedades (elasticidad, densidad, etc.) de tal modo que la velocidad de propagación de la onda depende de ellas, para poder propagarse. La OEM no requiere de medio y porque se le llama vacío, y cuáles son esas propiedades, se supone que la velocidad de propagación de ella debe depender de estas propiedades.</p>

3. Fuentes

- Alfonso, A. L. (2012). *Propuesta fenomenologica de las ondas electromagnéticas*. Bogotá: Universidad pedagógica nacional.
- Ayala, M. M. (2006). *Los Análisis histórico-crítico y la recontextualización de los saberes científicos*. Bogotá : Universidad Pedagógica Nacional.
- Belendez, A. (2008). *La unificación de la luz, electricidad y magnetismo: la síntesis electromagnética de Maxwell*. España.
- Berkson, W. (2008). *La teoría de campos de fuerzas desde Faraday hasta Einstein*. España: Versión española de Luisa Gonzalez Seco.
- Castillo, J. C. (2008). La historia de las ciencias y la formación de maestros: la re-contextualización de saberes. *Nodos y Nudos*.
- Castner, J. (1901). *trabajos científicos, la telegrafía eléctrica sin hilos conductores* . Recuperado el 17 de Agosto de 2014, de www.bibliotecavirtualdefensa.es/BVMDefensa/il8n/catalogo.../grupo.cmd?...
- Ducretet, A. (s.f.). *Metodos Hercianos, sus fundamentos*. Tabojo en España.
- Hertz, H. (1990). *Ondas electromagnéticas*. Barcelona : Universidad politécnica de Cataluña.
- Maxwell, J. (1887). *trate de la electricidad y del magnetismo* . Francia: Jaques Gaboy.
- Moreira, M. A. (1988). Modelos mentales Y aprendizaje de física en electricidad y magnetismo. *Revista de enseñanza de las ciencias*.

4. Contenidos

El trabajo está dividido en 3 capítulos

1. Ubicación del trabajo: Donde muestra cual es el objetivo del trabajo, su metodología, antecedentes, el problema a abordar, que de alguna manera ayudan al desarrollo del documento.
2. Aspecto disciplinar: Empezamos a abordar el concepto de onda, que de alguna manera, sirve de gran ayuda para comprender el concepto de la onda electromagnética, también se aborda la teoría de Ampere, la ley de Faraday, teoría de Maxwell y los experimentos de Hertz; sin embargo lo mencionado anteriormente, de alguna manera nos da cuenta del fenómeno.
3. Reflexión pedagógica: Hay que rescatar que un trabajo de corte histórico, muestra de donde surge y cuáles son los precursores de las teorías y leyes físicas, que de alguna manera son de gran importancia para la comprensión de los experimentos y su formulación matemática, en este caso relacionadas con el electromagnetismo; y que además ayudan la enseñanza, a que los estudiantes tengan claro los conceptos relacionados con este fenómeno.

5. Metodología

La metodología que se empleó para el desarrollo del trabajo fue la re-contextualización de saberes la cual se define como situar, insertar, articular un conocimiento, de manera significativa, en un nuevo contexto; lo cual implica la construcción de un nuevo discurso, con finalidades funciones y estructuras propias, que deliberadamente dejan de lado el discurso original, pero que de alguna manera lo toman como base.

En particular esto es lo que nos lleva a contemplar el profesor como el principal agente re-contextualizador, porque es esa labor la que lo hace reconstruir conocimiento, significado, lenguaje, códigos y prácticas de acuerdo de quienes aprenden (estudiantes de física). Igualmente, a pesar de la re-contextualizaciones la universidad surge como condición indispensable para la enseñanza, por la intencionalidad que atraviesan los sujetos en este espacio más en el área de las ciencias y las particularidades en el proceso de transformación o adaptación de conocimiento.

6. Conclusiones

- Al analizar el fenómeno ondulatorio el cual se propaga o trasmite una condición dinámica; donde la energía se puede transmitir de un lugar a otro por interacción de cuerpos. El movimiento ondulatorio comparte propiedades que se dan en la naturaleza, como la reflexión, y refracción, estas son para todo tipo de onda, la difracción, polarización e interferencia, estas propiedades solo afectan las ondas transversales y la luz (ondas electromagnéticas). Estos fenómenos gobiernan las propiedades de las ondas.
- Al analizar el modelo mecánico da cuenta que fue de gran ayuda para Maxwell, ya que le permitió desarrollar la formulación matemática que identificó la luz como vibraciones del campo electromagnético; en particular que las ondas transversales de velocidad finita se mueven por el campo y las líneas de fuerza describen la vibración lateral de la que habla Faraday. Para esta época ya existía una teoría general de la elasticidad que fijaba la velocidad de las ondas transversales en un mecanismo sujeto a las leyes de Newton. Según esta teoría, el cuadrado de la velocidad de las ondas transversales es igual al coeficiente entre la rigidez y la densidad del medio $v^2 = \frac{r}{d}$, esto se reducía, por tanto, a la rigidez y densidad del mecanismo en términos de las propiedades electromagnéticas.
- El concepto de éter (vacío) para Maxwell, está constituido de masa y es una sustancia elástica; actúa solo sobre las contiguas, por ende la velocidad de propagación debe ser finita. Sin embargo había razones por las cuales el éter poseía propiedades electromagnéticas ya que el campo electromagnético está formado de vacío.

- Se analizaron los experimentos de Hertz, los cuales dan cuenta que el circuito detector está sintonizado, para que entre en resonancia con el oscilador primario, siendo así mucho más sensible que un circuito ordinario. Cuando Hertz realizó el experimento, descubrió que las chispas (oscilaciones) del circuito detector tenían la misma intensidad que el primario. Y la velocidad se obtiene simplemente al relacionar la distancia entre dos nodos y la frecuencia de la onda. Es así como queda comprobada la existencia de la onda electromagnética.
- Al examinar el trabajo de Hertz, presenta la inducción de un oscilador sobre un resonador separados entre sí, sin embargo es donde se pueden ver las primeras ondas hercianas. Demuestra que existe una inducción de corriente, de un circuito a otro, donde la acción inductiva es de carácter electrodinámico, que es causado por las altas frecuencias que circulan por el alambre. Para conseguir una fuerte inducción, Hertz aumentó la capacidad del circuito de descarga y abrió los extremos del circuito lateral.
- Se introduce un documento meta-cognitivo el cual, conduce al lector al análisis y reflexión sobre los experimentos y dificultades que se encuentran en el desarrollo del concepto de la onda electromagnética y su medio de propagación; partiendo de la teoría de Maxwell y el libro original de ondas electromagnéticas de Hertz.

Elaborado por:	Ana Consuelo Segura López
Revisado por:	Juan Carlos Castillo Ayala

Fecha de elaboración del Resumen:	5	3	2015
--	---	---	------

INDICE GENERAL

CAPITULO I	9
1. Ubicación del trabajo	9
1.1. Introducción	9
1.2. Antecedentes	10
1.3. presentación del problema abordado.....	13
1.4. presentación de objetivos	14
1.4.1. Objetivo General	14
1.4.2. Objetivos específicos	15
1.5. presentación de la metodología.....	15
CAPITULO II	18
2. Aspecto disciplinar	18
2.1. Onda.....	18
2.2. Ecuación de onda	19
2.3. Comportamiento ondulatorio	21
2.4. Medio de propagación de onda	21
2.5. Ley de ampere.....	23
2.6. Ley de Faraday (inducción electromagnética)	25
2.7. Teoría de maxwell.....	29
2.7.1. El modelo mecánico de maxwell del campo electromagnético	30
2.7.2. Magnitudes mecánicas y electromagnéticas	31
2.7.3. Ondas electromagnéticas en el vacío	34
2.8. Fenomenología de la onda electromagnética de Hertz.....	37
2.8.1. El descubrimiento de las oscilaciones rápidas	39
2.8.2. Inducción de corrientes abiertas.....	45
2.8.3. Fenómeno de resonancia.....	48
2.8.4. La idea de las ondas electromagnéticas.	50
2.8.5. La velocidad de propagación de las acciones electromagnéticas es finita.....	52
2.8.5. Comprobación experimental de los fenómenos que caracterizan las ondas hertzianas.	54

2.8.6.1. Polarización:	54
2.8.6.2. Reflexión:.....	55
2.8.6.3. Refracción:	56
2.8.6.4. Difracción:	57
2.8.6.5. Interferencia:	57
CAPÍTULO III	58
3. Reflexión del aspecto pedagógico	58
3.1. Re-contextualización de saberes	58
A. ANEXOS	70
A.1. Las ondas electromagnéticas en el aire y su reflexión	70
A.2. Propagación de las ondas eléctricas por alambres	71
A.3. Ondas eléctricas estacionarias.....	72
A.4. Indicación de la onda magnética	73
A.5. Efectos electromagnéticos producidos por las perturbaciones eléctricas en los aisladores.....	74
A.6. Las fuerzas de las oscilaciones, tratadas según Maxwell.....	76

CAPITULO I

1. Ubicación del trabajo

1.1. Introducción

Mediante una re-contextualización de saberes se abordara el concepto de onda electromagnética y del medio de propagación de esta, de tal manera que permite evidenciar y caracterizar el fenómeno de la onda electromagnética, y además que queda claro el concepto de onda.

Es importante realizar este trabajo sobre el concepto y medio de propagación de las ondas electromagnéticas, debido a que en la universidad pedagógica nacional no se ha realizado ningún trabajo desde esta perspectiva, de tal manera es interesante e importante para la comprensión y enseñanza del electromagnetismo y ondas, es decir que los estudiantes no sigan presentando dificultades en el concepto de onda y además puedan relacionar la onda mecánica con la onda electromagnética. Sin embargo se puede entender varios conceptos, teorías y comprender fenómenos para la enseñanza de la física a partir de la historia de las ciencias (física), en este caso sobre la teoría de Ampere, la ley de Faraday, teoría de Maxwell y los experimento de Hertz; sin embargo lo mencionado anteriormente, de alguna manera nos da cuenta de este fenómeno. En este contexto surgen algunos interrogantes debido a la historia del concepto de la onda electromagnética (OEM):

¿Qué significa que el medio de propagación sea el vacío?

¿Cuál es la diferencia entre las ondas mecánicas y las ondas electromagnéticas?

Por otro lado también es importante porque permite entender e interpreta la caracterización del medio y además los fenómenos que sucede en la onda electromagnética y así poder relacionar este concepto con la vida cotidiana como en los aparatos tecnológicos, telecomunicaciones, rayos x, etc.

En relación con los aspectos mencionados en este trabajo se aborda el concepto de onda, particularmente el de onda electromagnética; haciendo un especial análisis sobre el vacío como medio de propagación de la misma.

Se toma como referente algunos trabajos de Maxwell y Hertz, ya que estos aportan a la comprensión de los fenómenos y consideraciones físicas que están a la base del concepto de onda electromagnética. Estos análisis se hacen con el fin de aportar elementos conceptuales a la enseñanza del electromagnetismo, en particular la propagación de las ondas electromagnéticas.

1.2. Antecedentes

Se describen algunos trabajos relacionados con la OEM; en particular tratan de como los experimentos ayudaron a comprobar la teoría de Maxwell, a caracterizar este concepto, y de alguna manera tienen relación con la enseñanza y aprendizaje de las ciencias; por lo tanto se les da una cierta relevancia.

El trabajo (Alfonso, 2012) sobre la Propuesta fenomenológica para la enseñanza de las ondas electromagnéticas basada en los trabajos de Hertz. Este trabajo nos muestra los experimentos más importantes con los cuales Heinrich R. Hertz pudo hablar y plantear el concepto de onda electromagnética y su medio de propagación el vacío; sin embargo nos muestra que el vacío tiene unas ciertas propiedades como la permitividad eléctrica y permeabilidad magnética por las cuales están relacionados con la propagación de dicha onda. Por otro lado, se presentan los conceptos de onda como tal y oscilación; por ende estos conceptos nos ayudan a comprender de mejor manera la OEM. Es un trabajo de corte histórico en el cual plantea una serie de experimentos con los cuales se pueden detectar ondas electromagnéticas.

(Gambua), Los experimentos de Hertz. Trata sobre todo la crisis que existió en física en la última mitad del siglo XIX debido a la incapacidad de las teorías de Newton para explicar el comportamiento del electromagnetismo y la luz. Los experimentos de Hertz fueron la prueba triunfal de las ideas de Maxwell y un importante apoyo a la teoría del éter.

Este artículo puntualiza que mientras se está cargando o descargando un condensador, circula una corriente por el circuito, y esta corriente causa un efecto electromagnético en los conductores del circuito, y en el dieléctrico del condensador. Todas las teorías estaban de acuerdo sobre los conductores, y la experiencia dice que es así (Hertz). Sin embargo diferían en lo que ocurre en el dieléctrico del condensador. Según la teoría de Maxwell también se tiene que generar una fuerza electromagnética, las demás teorías negaban la influencia de los dieléctricos en el comportamiento electromagnético. Lo dicho anteriormente es importante ya que el vacío se comporta como un dieléctrico.

(Castner, 1901) Algo interesante de este trabajo muestra, que Hertz utilizó la descarga oscilante de un condensador, para obtener variaciones eléctricas de una variación comparable en cierto modo a las vibraciones luminosas, aunque de frecuencias más pequeñas.

Hertz tuvo que buscar, para realizar sus experimentos, un dispositivo que revelara la propagación sucesiva de las oscilaciones eléctricas y sus efectos a distancia, dando por resultado sus investigaciones el invento de un aparato llamado resonador el cual se presenta más adelante y se explica.

Combinando el oscilador y el resonador consiguió Henri Hertz, en sus experiencias, originar, por medio de las ondulaciones eléctricas, los fenómenos característicos de las ondas luminosas.

El oscilador le servía para producir y transmitir las ondulaciones; y el resonador, como receptor de la misma, hacía apreciable a distancia sus efectos inductivos. Las oscilaciones hercianas, además de las propiedades de propagación en el espacio con igual velocidad que la luz, son susceptibles de originar los mismos fenómenos que las radiaciones luminosas como la refracción, reflexión, difracción, interferencia etc.

Presentan otras características notables que se pueden observar cuando se considera el funcionamiento relativo de un mismo resonador, cuando se le somete a los efectos inductivos de un oscilador. También hace una semejanza entre algunos fenómenos eléctricos y acústicos; se comprende el motivo por el cual se le llama resonador el aparato que utilizó Hertz para hacer apreciable a distancia los efectos de las oscilaciones electromagnéticas.

Este es otro artículo de (Campo y ondas); donde muestra las ecuaciones de Maxwell, se trata la propagación de ondas electromagnéticas en el espacio libre en forma general, para después particularizar en un caso simple, pero es importante, que muestra el caso de ondas planas en dicho espacio libre.

El espacio libre es un medio homogéneo, lo que implica que sus características son constantes, es decir que tanto la permitividad, como la permeabilidad y la conductibilidad son constantes. El espacio libre es también un medio eléctricamente y magnéticamente isotrópico (igual), lo que implica que tanto la permeabilidad como la permitividad son escalares. Por otra parte, en el espacio libre la conductibilidad es nula y la permitividad y la permeabilidad son iguales a aquellas correspondientes al vacío. Como se puede inferir, la definición de espacio libre coincide con aquella correspondiente a un dieléctrico perfecto.

En la resolución de cualquier problema electromagnético (OEM) se deben satisfacer (Campo y ondas) las cuatro relaciones fundamentales, donde estarán involucradas la ley Ampere Y de Faraday; pues que de cierta manera ayudan a la comprensión para la enseñanza de este concepto.

(Ayala, 2006) Muestra que en el ámbito de la formación de maestros de ciencias, se ha visto la historia y filosofía de las ciencias como una forma de incidir sobre la imagen que de la ciencia tienen los maestros, dado el importante papel que ésta juega en la orientación de su labor pedagógica. Se enfatiza, cada vez más, en enfoques que ponen presente el carácter constructivo del conocimiento científico y su historicidad, presentando la actividad científica ligada a los contextos en los que se realiza y

respondiendo a las exigencias e intereses generados en esos contextos específicos (contextos intelectuales, sociales, políticos etc.).

1.3. presentación del problema abordado

Comúnmente en la enseñanza de la física, cuando se aborda los fenómenos ondulatorios, se suele definir la onda como un tipo de movimiento que transporta energía, sin que ello requiera del transporte de cuerpos. Por otra parte, si se hace un estudio más profundo sobre los fenómenos ondulatorios es posible evidenciar que la onda es una perturbación-desequilibrio- local en un medio continuo que viaja, o se propaga, a través de él; para el caso de las ondas mecánicas el medio de propagación puede ser sólido, líquido o un gas.

Para hacer la descripción de la propagación de la perturbación, en el medio continuo, se requiere hacer un análisis del desequilibrio en una pequeña parte de dicho medio, con el fin de establecer las condiciones para su propagación, la cual implica que el desequilibrio se trasmite de un punto hacia sus vecindades. Además esta descripción permite comprender que la manera como se propaga el desequilibrio, en el medio, depende de las propiedades físicas del mismo, particularmente en las ondas mecánicas la elasticidad y la densidad; así, la velocidad de propagación se expresa en términos de una razón entre el módulo de elasticidad y de la densidad del medio.

En síntesis, la onda es la perturbación-desequilibrio- que viaja a través de un medio continuo, cuya propagación depende de las propiedades del mismo.

En la enseñanza de las ondas electromagnéticas se suele afirmar, que a diferencia de las ondas mecánicas, éstas se propagan en el vacío mediante la perturbación del campo electromagnético que implica variación espaciotemporal de éste. Si bien en el electromagnetismo el vacío es caracterizado mediante la permitividad eléctrica y permeabilidad magnética, y la velocidad de propagación de la onda electromagnética depende de estas propiedades, al definir la onda electromagnética, en algunos cursos y

textos introductorios (Serway, 1997) se presenta como la ausencia total de medio, con lo cual la onda electromagnética se define como aquella que no requiere de medio de propagación.

Por otra parte, en los cursos y textos introductorios, luego de la definición de onda electromagnética, como se menciona anteriormente, no hace referencia alguna a los fenómenos mediante los cuales se llega al concepto de onda electromagnética, únicamente se menciona su importancia en campos como las telecomunicaciones y en la óptica física, desde la cual se caracteriza la radiación como una onda electromagnética y se presentan las ecuaciones que la describen.

Además como se presenta el concepto de la onda electromagnética genera una serie de dificultades para su comprensión, a través del concepto físico de la onda, es decir lo que se define como onda electromagnética no se interpreta como el concepto de onda.

En la enseñanza del electromagnetismo (Universidad pedagógica nacional) es acostumbrado no presentarse ninguna evidencia o experimento que muestre el fenómeno que sucede en la onda electromagnética. Por lo cual esto nos permite hacer un análisis que nos lleva a la siguiente pregunta.

¿**Mediante** qué situaciones y consideraciones físicas es posible comprender el concepto de onda electromagnética, y caracterizar el vacío como medio de propagación; con el fin de aportar elementos para la enseñanza del electromagnetismo en cursos introductorios de física?

1.4. presentación de objetivos

1.4.1. Objetivo General

Hacer un análisis de corte conceptual de los trabajos de Maxwell y Hertz que permita la definición del concepto de onda electromagnética y la caracterización del

vacío como medio de propagación, con el fin de aportar elementos para la enseñanza de las ondas electromagnéticas en cursos introductorios.

1.4.2. Objetivos específicos

- Contextualizar los estudios del movimiento ondulatorio, que desde la onda mecánica, se evidencien como base para el estudio de la onda electromagnética.
- Examinar los trabajos de Maxwell y Hertz con el fin de determinar la caracterización del vacío como medio de propagación de la onda electromagnética (OEM).
- Hacer un estudio acerca de los trabajos de Maxwell y Hertz, para establecer que fenómenos y consideraciones, permiten definir el concepto de onda electromagnética.
- Diseñar una ruta pedagógica para el aporte del aprendizaje y enseñanza de la física. Lo cual permite aportar elemento para la enseñanza del electromagnetismo en cursos introductorios de la universidad pedagógica nacional.

1.5. presentación de la metodología

Hay que rescatar que un trabajo de corte histórico, muestra de donde surge y cuáles son los precursores de las teorías y leyes físicas, que de alguna manera son de gran importancia para la comprensión de los experimentos y su formulación matemática, en este caso relacionadas con el electromagnetismo; y que además ayudan la enseñanza, a que los estudiantes tengan claro los conceptos relacionados con este fenómeno.

Es así como la enseñanza de la física, se ha enriquecido con la historia de las ciencias, en particular, ha recobrado un reconocimiento en el ámbito de la formación de profesores de física. La historia de las ciencias se ha planteado como un “recurso” para el maestro de ciencias en la cual debe ser formado, sin embargo la puede emplear para su finalidad. Por ende se puede examinar desde diferentes ámbitos, como la motivación, rescate de argumentos, la caracterización de la naturaleza, estrategias didácticas, etc. La

discusión histórica y epistemológica sobre las ciencias permiten la reflexión sobre el que hacer y el conocimiento científico, donde se asume que es necesario para la formación de un licenciado en física (Ayala, 2006, pág. 20)

Algo importante debido a la actividad de hacer física, tiene una condición muy rigurosa con la formulación matemática y el experimento. Es aquí donde se muestra que Hertz ya conocía la teoría de Maxwell y de sus precursores, la cual fue comprobada por el experimento, dando cuenta de dicho fenómeno.

La historia de la física da una mayor comprensión, de la disciplina y facilita elementos para que el maestro conforme rutas de trabajo y aborde la enseñanza de la física; es así, que este documento está planteado para la ayuda, y además aporte elementos al estudiante que de alguna manera entienda los conceptos y fenómenos en relación con la ciencia (OEM), por ende el alumno será capaz de desarrollar los ejercicios e interpretar fenómenos naturales.

El conocimiento, y la ciencia no puede ser entendida como producto terminado, sino como una actividad, en la cual se formulan problemas, se estructuran fenómenos y construyen explicaciones, actividad situada en contextos particulares que se constituyen en espacio de significación donde esta cobra sentido para los sujetos involucrados (Castillo, 2008), (estudiantes). Por otra parte es así como se pretende abordar el siguiente trabajo, que es de gran ayuda para la enseñanza de la física.

Por otro lado, esto permite que el estudiante construya un conocimiento significativo, que elabore y desarrolle estructuras conceptuales, que le permitan comprender y actuar sobre la realidad, con ayuda de la estructura que ya posee. Es así como el conocimiento se vuelve comprensible, flexible, reorganizable, compatible. En este orden de ideas es evidente que la enseñanza de la física en general, genera condiciones para que el estudiante desarrolle procesos de re-contextualización de saberes científicos, que de alguna manera posibiliten un enriquecimiento de su percepción del mundo natural en relación con la onda electromagnética. Ya que la re-contextualización de saberes se considera como un dinamismo constructivista y dialógico en busca de elementos para la

elaboración o solución de un problema que depende obviamente de los intereses, conocimiento y experiencias, en este caso de los estudiantes en formación.

Es aquí donde se muestra un acercamiento a las fuentes originales y el análisis que se realiza, tiene de alguna manera un objetivo constructivo; en particular es una forma de construir herramientas para la enseñanza de la física; en cuanto permite el análisis de configurar una mirada al fenómeno que se aborda en el texto original, ya que esto permite elaborar criterios para orientar los procesos de conocimiento en el aula.

CAPITULO II

2. Aspecto disciplinar

2.1. Onda

Para contextualizarnos un poco; empezamos a abordar el concepto de onda, que de alguna manera, sirve de gran ayuda para comprender el concepto de la onda electromagnética. Las ondas son un fenómeno natural e importante; las ondas en el agua, las ondas en las cuerdas, las ondas de presión, las ondas de sonido etc. Son ejemplos cotidianos de ondas.

Se suele definir la onda como un tipo de movimiento que transporta energía, sin que ello requiera del transporte de cuerpos (masa). Al hacer un análisis profundo sobre los fenómenos ondulatorios, es posible evidenciar que la onda es una perturbación-desequilibrio- local en un medio continuo que viaja, o se propaga, a través de él; por tanto la propagación de una propiedad física o perturbación (temporal) en este medio, hace que varíe alguna magnitud física, dependiendo el medio de propagación; para el caso de las ondas mecánicas el medio de propagación puede ser sólido, líquido o un gas. Pero si hay ausencia de medio no existe ningún tipo de onda.

Cuando una onda se propaga en un medio material, cada parte de esta oscila alrededor de su posición de equilibrio, de modo que hemos de tener en cuenta las vibraciones de muchas partículas, en lugar de una sola. Si las vibraciones de dichas partículas son perpendiculares a la dirección de propagación de la onda, se dice que es transversal. Si las partículas oscilan en la dirección de propagación de la onda, la onda se denomina longitudinal (Semanky, 1989).

Se supone que cualquier punto de la trayectoria de propagación se produce un desplazamiento periódico, u oscilación, alrededor de una posición de equilibrio, ya sea longitudinalmente o transversalmente y además varía con el tiempo.

Sin embargo el tren continuo de perturbaciones resultante, que se propaga con una velocidad depende de alguna manera de las “propiedades del medio”, por ende se denomina onda.

Es de gran interés, mostrar el significado que le da Hertz a este concepto, y la define como un desplazamiento aparente de una configuración de forma sinusoidal, con sus crestas y sus valles. Propiamente consiste en la propagación, por un medio elástico, de una oscilación estacionada en cada uno de sus puntos, cuya elongación es función sinusoidal de un argumento lineal en el espacio y en el tiempo.

2.2. Ecuación de onda

Todas las ondas elásticas satisfacen la “ecuación de onda” y su estudio formal es idéntico; sin embargo hay varias diferencias, en cuanto a velocidades de propagación, fenómenos de dispersión, etc.

Es de gran interés describir matemáticamente una situación que se produce en muchos campos de la física. En particular en un punto del espacio, que llamaremos foco o fuente, se produce una perturbación, correspondiente a un cambio temporal en el valor de una magnitud física; es decir, la presión, la densidad, el campo electromagnético, etc. Y dicha perturbación se propaga a otros puntos del espacio (desequilibrio en un medio continuo) en los que se produce de forma análoga a como se hizo en el punto inicial, de tal modo se produce un movimiento ondulatorio. Lo que muestra la ecuación de onda es la configuración del movimiento del fenómeno.

Por ejemplo, si una cuerda es sometida a una tensión y tiene una densidad, que en equilibrio permanece horizontal. En un determinado instante la cuerda se desplaza verticalmente de su posición de equilibrio una cantidad $y(x, t)$.

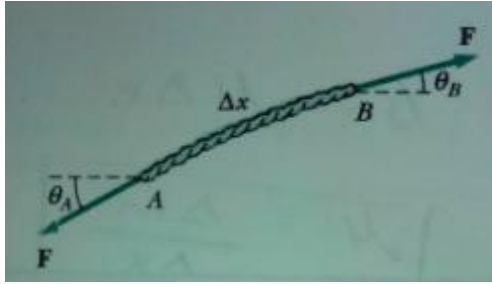


Figura 1. (Serway, 1997, pág. 472)

Si se aborda un aspecto dinámico, se parte de la observación de que cada cuerda tiene un elemento de inercia, su masa, y un elemento dinámico, la tensión a la que está sometida (ver figura 1). Esquema para la aplicación de la segunda ley de Newton a un elemento de cuerda sometido a una tensión. La derivada primera de y con respecto a x , $\frac{\partial y}{\partial x}$ proporciona la dirección de las tensiones; mientras que la derivada segunda $\frac{\partial^2 y}{\partial x^2}$ se relaciona con la fuerza neta transversal aplicada. La derivada parcial respecto al tiempo $\frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$ se relaciona directamente con la aceleración que experimenta el segmento de cuerda de acuerdo a la tensión aplicada. Se llega a la siguiente relación entre las derivadas parciales de segundo orden de y respecto a x y t :

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$$

Donde la velocidad está relacionada con la tensión aplicada y la densidad lineal de la misma.

La ecuación general de onda, siguiendo el proceso similar, que se hizo con la ecuación de onda en una dimensión, se puede demostrar que cualquier onda verifica la ecuación (tres dimensiones), puede ser en el caso de la onda electromagnética.

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 y}{\partial z^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$$

Las anteriores ecuaciones se denominan ecuaciones de onda pero realmente ecuaciones de onda hay muchas; lo que pasa es que estas ecuaciones representan el

comportamiento ondulatorio de las magnitudes físicas, en un conjunto tan extenso de fenómenos. Es decir, es el carácter ubicuo de esta ecuación la que otorga gran importancia en la física y la solución de estas ecuaciones son un poco más sencillas.

Las ecuaciones de ondas son las que describen los fenómenos ondulatorios; como la propagación del sonido, la propagación de la onda electromagnética, vibración en cuerdas, barras y membranas, vibraciones producidas por terremotos, oscilaciones de péndulos, etc. Aunque hay muchas diferencias en cuanto a la velocidad de propagación debido a las propiedades (tensiones, densidades, etc.) del medio en que viaja la onda.

2.3. Comportamiento ondulatorio

Lo mencionado anteriormente se denomina fenómeno ondulatorio; consiste en la propagación de una propiedad física o perturbación¹. Descrita por un campo (ondas electromagnéticas u ondas elásticas), a través de un medio; en general se propaga o transmite una condición dinámica; donde la energía se puede transmitir de un lugar a otro por interacción de cuerpos. El movimiento ondulatorio comparte propiedades que se dan en la naturaleza, como la reflexión, y refracción, estas son para todo tipo de onda, la difracción, polarización e interferencia, estas propiedades solo afectan las ondas transversales y la luz (ondas electromagnéticas). Estos fenómenos gobiernan las propiedades de las ondas.

2.4. Medio de propagación de onda

El medio en el que se transmiten las ondas puede ser; aire, un líquido, una cuerda tensa, etc. E incluso el vacío²; que al ser perturbado permite la propagación de tal perturbación. Esta perturbación es un desequilibrio local, para el caso de las ondas mecánicas puede ser una diferencia de presión o de tensión debido a un desplazamiento local del medio o cambio de configuración.

¹ Variación de alguna magnitud.

² Solo para el caso de ondas electromagnéticas.

La propagación del desequilibrio, o perturbación, dependerá de las propiedades físicas del medio relacionado con el desequilibrio, en este caso la elasticidad del medio, puesto que la perturbación está relacionada con un desplazamiento local del medio, la propagación también dependerá de la densidad; así la velocidad se formula en términos de una razón entre el módulo de elasticidad y la densidad del medio.

$$v = \frac{\bar{Y}}{\rho}$$

Para el caso de la onda electromagnética, el medio de propagación puede ser el vacío, como se dijo anterior mente, pero el vacío no puede ser considerado como ausencia total de materia, ya que, si bien no se asignas propiedades mecánicas, densidad y elasticidad; si se le asigna propiedades eléctricas y magnética, permitividad eléctrica y permeabilidad magnética, de las cuales depende la velocidad de propagación de la onda electromagnética.

$$c = \frac{1}{\epsilon\mu}$$

Hasta aquí se aborda lo más elemental del concepto de onda, onda mecánica, su medio de propagación y algunas relaciones con la onda electromagnética; que pues son útiles para en tender lo que sigue; y así entender el concepto.

Es así que las ondas electromagnéticas es un tipo de radiación que se propaga en forma de ondas, denominada electromagnética ya que se predijeron por primera vez dentro de la teoría electromagnética, en 1865. Los primeros experimentos (1888) generando y detectando ondas electromagnéticas (no visibles) también fueron basados en fenómenos electromagnéticos (En los experimentos de Óptica con luz visible conocidos desde mucho tiempo antes, se desconocía la naturaleza electromagnética de la luz).

La ley de Faraday dice que si un campo magnético, H, varía con el tiempo actúa como una fuente de campo eléctrico y según la ley de Ampere un campo eléctrico, E, variable actúa como una fuente de campo magnético.

De este modo cuando uno de los campos varia con el tiempo, se induce un campo del otro tipo en las regiones adyacentes del espacio. Esto lleva por lógica a considerar la posibilidad de una perturbación electromagnética, consistente en campos eléctrico y magnético que varían con el tiempo, que pueden propagarse de una región a otra del espacio vacío en la región intermedia. Tal perturbación tendrá las propiedades de una onda y un término adecuado para designarla es el de onda electromagnética.

2.5. Ley de ampere

A continuación se muestra la conocida como ley de Ampere, muestra la relación que existe entre el campo H y la fuente J cuando las corrientes y los campos no cambian en el tiempo, pero falla cuando los fenómenos no son estacionarios. La contribución de Maxwell se resume en haber agregado a J , el sumando $\partial D/\partial t$ correspondiente a la corriente de desplazamiento en los fenómenos no estacionarios, algo que nadie había medido y que no resultaba intuitivo. La falta de ese término deja fuera los casos dinámicos, muchos casos tan importantes como por ejemplo las Ondas Electromagnéticas. Corrección a la Ley de Ampere, introducida por Maxwell en 1861. Agregar la densidad de corriente de desplazamiento a la Ley de Ampere fue la mayor contribución de Maxwell al Electromagnetismo.

André Marie Ampere³ descubrió la interacción entre dos corriente; era uno de los que decía que la corriente actuaba solo entre fenómenos eléctricos- eléctricos y los fenómenos magnéticos con los fenómenos magnéticos; es decir entre fenómenos de la misma naturaleza. Donde en una conferencia llego a demostrar, que el fenómeno eléctrico y el fenómeno magnético se debían a dos fluidos diferentes. Ampere desarrollo un experimento el cual constaba de dos cables paralelos, por los cuales pasaba corriente, para verificar si había interacción, y se dio cuenta que se atraían y se repelían. Por tanto descubrió que dos corrientes paralelas se atraen y circulan en la misma dirección, en caso contrario se repelen.

³ Fue matemático, químico y filósofo francés.

Basándose en todos los experimentos que había desarrollado, Ampere empezó a desarrollar una teoría Newtoniana de la atracción entre corrientes; debido a la teoría de Newton, la atracción y repulsión se ejerce según la línea de unión de dos elementos de corriente, por lo tanto las fuerzas son centrales; además son inversamente proporcionales al inverso de la distancia. La teoría de ampere tenía un problema, y era que solo se podía desentonar, en corrientes cerradas; esto era lo que se pensaba hasta 1820 donde estos dos fenómenos no tenían relación.

En 1826, André-Marie Ampere publicó un estudio pionero, que resume el trabajo de cinco años de investigación sobre las leyes de la nueva ciencia que él había nombrado electrodinámica. Los resultados mostraron que, en el caso de la interacción del par de valores dos infinitesimalmente pequeños elementos de electricidad de corriente continua dentro de los conductores, la fuerza entre los elementos no dependía simplemente de la inverso del cuadrado de la distancia de separación, pero también dependían de los ángulos que estos elementos infinitesimales, direccionales hacen con la línea que une sus centros, y entre sí. (Incluido entre los efectos de la fuerza angular fue el resultado de que los elementos sucesivos de la corriente dentro del mismo conductor tenderían a repelen entre sí-la fuerza longitudinal.) (Hecht, 2001).

Basándonos en lo que había demostrado oersted⁴ y además, para que quede más claro lo dicho anteriormente; fue en ese año, donde ampere estableció una relación general del campo magnético y la corriente. Sin embargo la forma del conductor puede ser cualquiera, por el que circula la corriente de intensidad constante. Se sabe que la corriente eléctrica y el campo magnético asociados no son causa y efecto ya que ambos, aparecen simultáneamente al haber un movimiento de cargas. Matemáticamente la ley de ampere se expresa de la siguiente manera:

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I$$

⁴ En 1820 demuestra que la corriente que conduce un conductor produce un campo magnético.

Donde H es la intensidad del campo magnético, siendo C cualquier curva cerrada que rodea a la corriente I constante y μ_0 es la permeabilidad del vacío. Se puede decir que esta ley es solo para corrientes constantes.

Para generalizar aún más, supongamos que varios conductores largos y rectos pasan a través de la superficie limitada por la trayectoria de integración. El campo magnético total en cualquier punto de la trayectoria es la suma vectorial de los campos generados por los conductores individuales. Así, la integral de línea de H total es igual a μ_0 multiplicado por la suma algebraica de las corrientes. Al calcular esta suma se utiliza la regla de los signos para corrientes que; Si la trayectoria de integración no encierra un alambre particular, la integral de línea del campo de ese alambre es igual a cero, ya que el ángulo θ correspondiente a ese alambre barre un cambio neto de cero en vez de 2π durante la integración. Todo conductor presente que no esté encerrado por una trayectoria particular puede contribuir al valor de H en todos los puntos, pero las integrales de línea de sus campos alrededor de la trayectoria tienen un valor de cero (Semanky, 1989).

2.6. Ley de Faraday (inducción electromagnética)

Faraday había señalado en su trabajo de rotaciones electromagnéticas, que la teoría de Ampere era errónea, señalaba que la atracción y repulsión de los cables paralelos no es un fenómeno elemental en el que se base el magnetismo, sino un fenómeno complejo.

Según Faraday, las fuerzas actúan sobre otras fuerzas; es decir que se establece la igualdad entre la materia y la fuerza; se sabe que los cuerpos actúan unos sobre otros, pero si los cuerpos no son sino sistemas de fuerza, entonces las fuerzas actúan entre sí. Es más las fuerzas no actúan a distancia sino sobre otras fuerzas contiguas⁵. Al visualizar la concepción del mundo de Faraday, la fuerza es una sustancia universal que ocupa todo el espacio; por tanto a cada punto del campo de fuerzas se le asocia una

⁵ Esta hipótesis nos lleva a la idea de mar de fuerza

intensidad y una dirección; según sea la intensidad y la dirección de la fuerza, el punto de fuerza hará que los puntos vecinos se muevan. En particular todos los puntos interactúan con sus vecinos (puntos contiguos), dando lugar a todas las posibles distribuciones de fuerzas y vibraciones de estas. ¿Pero cómo se distribuyen la fuerza en torno a un punto de fuerza? Más tarde Faraday aclaró su teoría de campos al introducir la idea de línea de fuerza. Diciendo que las partículas están conectadas por líneas de fuerza y son, en sí mismas, puntos de convergencia de estas líneas.

Como los puntos de fuerza perturbados actúan a la vez con los puntos contiguos, toda variación del campo tendrá lugar a la velocidad finita, toda perturbación del campo necesita un campo para propagarse.

Después de un largo trabajo (experimentos), 1831 Faraday propuso un nuevo experimento en el cual se basó Hertz para realizar su trabajo, lo cual lo llevó a estudiar la forma que debería llevar un electroimán⁶ para que fuera muy potente y actuara intensamente sobre un círculo próximo al imanarlo bruscamente, decidió que la mejor forma era la de un anillo grueso de hierro, sobre una de las mitades del anillo arrolló un alambre varias veces cuyos extremos iban a una batería; sobre la otra mitad del anillo de hierro hizo exactamente lo mismo pero los dos extremos de los cables iban unidos a un galvanómetro, como se muestra en la figura 2. Por consiguiente al cerrar el circuito de la batería el anillo obviamente quedaba imanado.

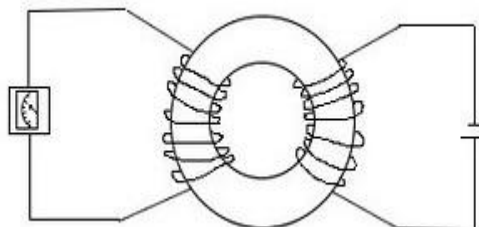


Figura 2. Inducción electromagnética. Modificada (Berkson, 2008).

⁶ El electroimán se considera, como imán cuyo campo magnético se produce mediante el paso de una corriente eléctrica, esto es un imán accionado por electricidad.

Por lo tanto el galvanómetro es el que registraba el paso de corriente; al abrir el circuito el anillo se desimantaba y de nuevo se indicaba una breve corriente. Los mejores resultados que obtuvo Faraday de los experimentos se pueden sintetizar de la siguiente manera: cuando dos cables se arrollan helicoidalmente en torno a un núcleo de papel, uno de ellos se conecta a una batería, aparecía en el otro enrollamiento una corriente de la misma dirección; al abrir el circuito aparecería una corriente pero en sentido contrario; por otro lado si se introduce un imán dentro de una hélice, se observa un flujo de corriente, y si el imán se retira se observa una corriente en sentido contrario; es decir que al haber un incremento o una disminución de la fuerza magnética, lo que se obtenía es una corriente.

Cabe resaltar que aunque la inducción tuviera lugar a distancia, de forma que todo el campo que rodea al cable aumentara simultáneamente su intensidad magnética con la corriente, las líneas de fuerza (tal y como las dibujaba Faraday y Maxwell) saldría de un cable y cortarían al otro, el movimiento de las líneas de fuerza no contradice por sí mismo la teoría de acción a distancia (Berkson, 2008).

Al realizar una serie de experimentos Faraday vio de inmediato las diferencias entre su nueva concepción y la visión newtoniana del mundo. Los principales puntos de divergencia solían ser: 1. No existe acción a distancia sino únicamente la acción de un punto de fuerza del campo universal sobre puntos contiguos; y 2. Cualquier cuerpo materia en el seno de un campo de fuerzas sufre un cambio de fuerzas como resultado del campo, del que forma parte.

Faraday realizó varios experimentos, utilizando aislantes los cuales estaban sometidos a campos eléctricos; decía que los cuerpos aislantes serían aquellos cuyas partículas no pueden estar permanentemente polarizadas. Por otro lado esperaba que un dieléctrico actuase la acción de una corriente y, caso de estar polarizado; es decir cargado, produjese algún tipo de efecto. Por ejemplo el movimiento de un dieléctrico

dentro de un campo magnético provocaría la polarización, y el movimiento de un cuerpo cargado cerca de un cable induciría corriente en este.

Al aplicar su teoría, realizó una gran investigación de las descargas por chispas, las cuales se daban debido a la destrucción del estado dieléctrico. Los aisladores perfectos no existen, y cuando la tensión es suficientemente grande, las partículas del dieléctrico pierden su polaridad y comunican su fuerza por conducción, con lo dicho es que se explica por qué los rayos, o en general las descargas en chispas, parecen buscar el camino más fácil o más corto para efectuar la descarga. El camino está trazado por la tensión del dieléctrico. Faraday había buscado e investigado los efectos de materiales interpuestos sobre la fuerza magnética. Colocó un poco de laca entre un imán y un cable; moviendo el imán se inducía una corriente en el cable, sin observarse ninguna variación cuando se introducía la laca. En conclusión que un dieléctrico se polariza bajo la inducción electromagnética, de la misma forma que en los conductores aparecen corrientes.

Faraday daba sus argumentos sobre las líneas de fuerza y es que estas líneas se pueden curvar y tardan un tiempo en propagarse. Mediante un experimento demostró que la propagación de las líneas de fuerza a través del espacio tiene lugar a un tiempo finito. Si se aumenta la corriente que pasa por un cable, la fuerza magnética según Faraday, no aumenta simultáneamente en el espacio circundante; hay un lapso de tiempo entre que las fuerzas salen del cable y se propaga por los alrededores. Este tiempo finito de propagación del campo electromagnético, se descubrió hasta que en 1887 Hertz demostró la existencia de las ondas electromagnéticas. Explicó que la inducción electromagnética en un cable es proporcional al número de líneas de fuerza que lo atraviesan. Sobre la di-electricidad y el magnetismo señaló que las diferentes sustancias tienen diferente capacidad de conducción de las líneas de fuerza y demostró que con esta hipótesis se podía deducir la distribución de las líneas de fuerza en torno a un cuerpo dieléctrico⁷ o diamagnético (material que tiene menor permeabilidad magnética que el

⁷ Cuerpo que no conduce la electricidad, pero bajo la acción inductiva, es capaz de sufrir una polarización dieléctrica, es decir de separar ligeramente sus cargas positivas y negativas, formando dipolos y produciendo con ello corrientes de desplazamiento.

vacío, y es repelido por la acción de un fuerte imán). Con respecto a los cuerpos dieléctricos señalo que, al portar las líneas de fuerza, se polarizan eléctricamente.

La existencia de las ondas electromagnéticas fue predicha en la Teoría Electromagnética presentada en 1865 por el físico-matemático escocés James Clerk Maxwell (1831-1879), y confirmada por primera vez en 1888 por el físico alemán Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894), quien fue el primero en generarlas, detectarlas y estudiarlas. Las ondas electromagnéticas están compuestas por energía en forma de oscilaciones de campo eléctrico y campo magnético que se propagan como lo predicen las Ecuaciones de Maxwell.

De alguna manera lo anterior lo llevo a desarrollar la predicción de dicha onda. Maxwell desarrollo matemáticamente la mayoría de las ideas de Faraday; La inducción es producto de las líneas de fuerza en movimiento, la de la capacidad inductiva específica y de la permeabilidad magnética.

2.7. Teoría de maxwell

Maxwell al igual que Thomson creía que el campo electromagnético estaba formado por éter dependiente de las leyes de la mecánica newtoniana⁸, debido a esto era razón suficiente para examinar un mecanismo. Maxwell igual que Faraday tenía, argumentos metafísicos que le impulsaban a aceptar que la inducción electromagnética requería de un tiempo para propagarse por el campo.

El concepto de éter para maxwell, está constituido de masa y es una sustancia elástica; actúa solo sobre las contiguas por ende la velocidad de propagación debe ser finita. Sin embargo había razones por las cuales el éter poseía estas propiedades⁹, en este caso se refiere al éter aluminífero. Maxwell creía que el éter para la luz y para el electromagnetismo era diferente.

⁸ Berkson William, capítulo 6, pg 184.

⁹ A saber la velocidad finita de la luz.

El objetivo de Maxwell era la creación de una teoría unificada de la luz, electricidad y magnetismo. El punto de partida, se dio de la idea de Faraday la cual consiste en que la distribución de las líneas magnéticas de fuerza se podía determinar a partir de una tensión a lo largo de dicha línea y una presión entre ellas.

En su suposición maxwell implanta una hipótesis fundamental de que la masa de los remolinos (mecanismo) depende de la permeabilidad magnética del medio. La energía cinética de los remolinos está en función de la constante de permeabilidad magnética.

El segundo paso era encontrar una analogía mecánica de la corriente eléctrica que estableciera una relación entre esta y el magnetismo; pensó en bolitas eléctricas que separan un remolino magnético de otro.

El tercer paso fue suponer que el remolino está dotado de elasticidad. Por ende esta hipótesis exige una velocidad finita de variación de los estados del mecanismo.

2.7.1. El modelo mecánico de maxwell del campo electromagnético

El modelo mecánico del campo electromagnético de maxwell; fu el único modelo del éter de unificar la electricidad estática, la electricidad corriente, los efectos inductivos y el magnetismo, de tal manera que a partir de esto fue que Maxwell dedujo su ecuación del electromagnetismo y la teoría de la luz (OEM).

Para iniciar vamos a ver cómo funciona el mecanismo: la corriente y el campo magnético están relacionados de la siguiente manera; se dice que la corriente es el movimiento de partículas eléctricas, cuando una partícula se mueve roza las paredes del remolino magnético contiguo y lo pone en movimiento. Sin embargo este remolino pone en rotación todas las partículas eléctricas que están en contacto con este. Las partículas rozan al girar contra los remolinos en contacto con ellas, provocando su rotación; y así hasta que todo el espacio se llena de remolinos magnéticos en movimiento. Por lo tanto una partícula eléctrica con libertad de movimiento en un conductor produce un campo magnético alrededor de un cable.

Lo más interesante del modelo mecánico del campo electromagnético, es la descripción de la inducción electromagnética. Berkson lo explica de la siguiente manera, se tienen dos cables conductores, en uno de ellos recorre una corriente estacionaria. Se supone que un dieléctrico rodea a los dos cables. Las bolas eléctricas del primer cable se moverán a su través, rozando con los remolinos magnéticos del exterior del cable; estos remolinos se restregarán contra otras bolas eléctricas, que a su vez rozan con otros remolinos, etc. Las bolitas del dieléctrico girarán sin trasladarse, debido a la igualdad de las velocidades de los remolinos a ambos lados de la bola. Es decir, que las bolas eléctricas del otro cable, aunque libres de moverse, no tienden a hacerlo, sino que giran sin traslación como las del dieléctrico.

Para construir el modelo mecánico y deducir sus propiedades Maxwell se impuso varias condiciones, que eran relacionar la elasticidad y la masa con mecanismos con propiedades electromagnéticas y la necesidad de ser congruente con los experimentos del electromagnetismo ya conocidos.

2.7.2. Magnitudes mecánicas y electromagnéticas

Las magnitudes mecánicas y eléctricas están incorporadas específicamente por un aspecto del modelo mecánico. Sin embargo en un conductor, la intensidad de corriente en un punto (j) se representa por el número de bolas que pasan por ese punto en un segundo y la densidad de masa de los remolinos se corresponde con la permeabilidad magnética μ del campo. Por lo tanto, la energía del campo magnético está dada por la energía cinética de los remolinos en movimiento que es proporcional a μH^2 .

Por otro lado si las bolitas hacen parte de un dieléctrico, no podrán desplazarse de su posición, pero si sufrir una deformación elástica bajo la acción de las fuerzas que actúan sobre ellas. El grado en que el material de una bola eléctrica se desplaza por efecto de las fuerzas depende de las constantes elásticas de las bolas. Maxwell supuso que el desplazamiento total (D) es directamente proporcional a la fuerza que actúa sobre la bola; la constante de proporcionalidad es análoga a la constante dieléctrica o capacidad

inductiva específica (ϵ)¹⁰ del medio ($D = \epsilon E^2$). La energía del campo eléctrico se corresponderá con la energía elástica de las partículas deformadas, esta energía tiene que ser igual al trabajo realizado para deformar las partículas: la fuerza ejercida por los remolinos multiplicada por el desplazamiento de la sustancia¹¹ (Berkson, 2008).

Un punto interesante del modelo de Maxwell, es que la carga está establecida por una presión mutua ejercida por las partículas eléctricas; y la presión es similar al potencial eléctrico o tensión (ϕ). En particular un cuerpo cargado es aquel cuyas partículas eléctricas ejercen una presión neta sobre las partículas del dieléctrico circundante.

Maxwell dedujo sus ecuaciones en tres etapas; en primer lugar utilizó la hipótesis de los remolinos para explicar los efectos puramente magnéticos, la segunda etapa consistió en utilizar las bolas eléctricas para deducir la relación entre corriente y magnetismo, incluida la inducción. Y por último utilizó la hipótesis de la elasticidad de las bolas para explicar los fenómenos de la carga estática; esto lo llevó a la teoría electromagnética de la luz.

Como ya se había dicho, el punto de partida de Maxwell fue la sugerencia por Faraday de que existe una tensión en las líneas de fuerza y una presión en una de ellas. Faraday apuntó que la forma que toman las líneas en una situación determinada depende de la permeabilidad magnética del medio y precisó que el movimiento de un cuerpo magnético o diamagnético debía considerarlo como debido a la cuerda de tensión a lo largo de la línea de fuerza que pasa por el cuerpo y a la presión entre ella.

Esto fue de gran ayuda para Maxwell, ya que le permitió desarrollar la formulación matemática que identificó la luz como vibraciones del campo electromagnético; en particular que las ondas transversales de velocidad finita se mueven por el campo y las líneas de fuerza describen la vibración lateral de la que habla Faraday. Para esta época ya existía una teoría general de la elasticidad que fijaba la velocidad de las ondas transversales en un mecanismo sujeto a las leyes de Newton. Según esta teoría, el

¹⁰ Permitividad eléctrica

¹¹ Que es proporcional $ED = \epsilon E^2$

cuadrado de la velocidad de las ondas transversales es igual al coeficiente entre la rigidez y la densidad del medio $v^2 = \frac{r}{d}$, esto se reducía, por tanto, a la rigidez y densidad del mecanismo en términos de las propiedades electromagnéticas. Maxwell supuso que la masa de las bolas eléctricas y su elasticidad eran despreciables; toda la elasticidad y toda la masa están en los remolinos; y había demostrado ya que la densidad d de los remolinos podía correlacionarse con la permeabilidad magnética de medio μ dónde: $d = \pi\mu$.

Las propiedades elásticas claves de los remolinos es que el desplazamiento de su material es proporcional a la fuerza electromotriz que actúa sobre ellos. La constante de la proporcional es análoga a la capacidad inductiva específica del medio.

Para obtener relación entre la capacidad inductiva y la rigidez, Maxwell tenía antes que construir una teoría del desplazamiento producido por la acción de fuerzas electromotriz y de las fuerzas que se producen por este desplazamiento, la teoría tenía que cumplir una condición: los remolinos tenían que reaccionar a las fuerzas electromotrices de forma que permanecieran en equilibrio en una situación estática, con esta idea Maxwell supuso primero que la fuerza electromotriz que actúa sobre la materia que constituye el remolino varía con el seno del ángulo cuyo origen es el punto de contacto de la partícula eléctrica con el remolino. Luego supuso que el desplazamiento de la materia de las bolas era puramente tangencial: la materia podía sufrir una torsión alrededor del centro de la bola, no podía desplazarse ni hacia dentro ni hacia fuera, esta hipótesis es fundamental; es decir que el remolino tiende a dilatarse cuando está sometido a torsión, ya que permite que se originen en el mecanismo ondas transversales (Berkson, 2008).

Maxwell pudo finalmente establecer la relación entre la rigidez y la capacidad inductiva utilizando las hipótesis de los remolinos. Descubrió que la capacidad inductiva es $\frac{1}{4}$ del inverso de la rigidez: $\epsilon = \frac{1}{4}\pi c^2$ donde πc^2 es la rigidez. Maxwell logró conseguir la velocidad de las ondas transversales del mecanismo en términos de la capacidad inductiva y la permeabilidad magnética del medio. La densidad del medio

estaba relacionada con la permitividad magnética y la rigidez con la capacidad inductiva; se sabía que la razón entre ambas era la velocidad.

Así pues en el modelo mecánico de Maxwell, la velocidad de las ondas transversales es la misma que la relación entre las unidades electrostáticas y electromagnéticas. La fórmula $v = c \sqrt{\mu}$ es válida no solo en el vacío sino también en materiales dieléctricos, pudiéndose determinar c y μ de determinados materiales en relación al vacío.

Maxwell había demostrado que las ondas electromagnéticas se mueven a la velocidad de la luz. De acuerdo a la ecuación de onda:

$$\nabla^2 \mu H = \frac{4\pi\mu}{k} \frac{d^2 \mu H}{dt^2}$$

Este tipo de ecuación ya eran muy conocidas y que su solución eran ondas. En el caso de la onda plana su velocidad es: $\frac{c}{\sqrt{4\pi\mu}}$. Maxwell volvió a demostrar que k en el vacío es $4\pi c^2$, siendo c la razón entre las unidades electromagnéticas y electrostáticas.

2.7.3. Ondas electromagnéticas en el vacío

La existencia de las ondas electromagnéticas fue predicha por Maxwell, como resultado de un análisis de las ecuaciones del campo electromagnético (1873).

$$\nabla \cdot D(x, t) = d(x, t)$$

$$\nabla \cdot B(x, t) = 0$$

$$\nabla \times E(x, t) + \frac{\partial}{\partial t} B(x, t) = 0$$

$$\nabla \times H(x, t) - \frac{\partial}{\partial t} D(x, t) = J(x, t)$$

Respectivamente son, la ley de Gauss para el campo eléctrico, la ley de Gauss para el campo magnético, la ley de Faraday-Lenz y la ley de Ampere-Maxwell donde las dos últimas son propagación de campos electromagnéticos.

D Desplazamiento eléctrico

B Inducción magnética

E Campo eléctrico

H Excitación o intensidad magnética

d Densidad de carga

J Densidad o intensidad de corriente

Si el recinto es en el vacío y no hay fuente de campo en su interior

$$D = \varepsilon E$$

$$B = \mu H$$

$$d = 0$$

$$J = 0$$

Lo cual nos conduce a la ecuación de la onda anteriormente descrita

$$\nabla^2 E = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}$$

$$\nabla^2 H = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 H}{\partial t^2}$$

Es así como Maxwell había demostrado a partir de dichas ecuaciones que las ondas electromagnéticas se propagan a la velocidad de la luz, y que velocidad depende de la permeabilidad magnética y de la constante dieléctrica del medio. Demostró también, que la onda magnética debe ser transversal. Así pues, había conseguido obtener los mismos resultados que daba el modelo mecánico, sólo que utilizando únicamente sus ecuaciones. A partir de tales ecuaciones, dedujo nuevas propiedades de las ondas electromagnéticas, que podemos resumir así:

1. Estableció la relación entre la conductividad y la transparencia. Cuanto más conductor es un material, más absorbe la luz, y así, explicaba que los conductores sean opacos, y los medios transparentes buenos aislantes.

2. Calculó la energía de los componentes eléctricos y magnéticos de las ondas electromagnéticas, y descubrió que la mitad de esta energía era eléctrica y la otra mitad magnética.

3. En el caso de un rayo de luz polarizado en un plano, la onda eléctrica se propaga junto a la magnética dispuestas perpendicularmente entre sí. Señaló también que la resultante de la tensión electromagnética sobre un cuerpo irradiado con luz es una presión.

Donde esta teoría puede llamarse teoría del campo electromagnético por que trata del espacio en las proximidades de los cuerpos eléctricos y magnéticos, y puede llamarse teoría dinámica porque supone que en dicho espacio hay una materia en movimiento que produce los efectos electromagnéticos.

Con $c = \frac{1}{\mu\epsilon}$ que es la velocidad de la luz o de la onda electromagnética en el vacío. Todos sabemos que la luz viaja a 300.000 kilómetros por segundo, lo cual constituye no sólo un concepto teórico sino también un hecho experimental. Lo que muchos ni siquiera imaginan es que esa cifra no sólo es un viejo dato experimental, sin que también se desprenda magistralmente de las ecuaciones formuladas en la teoría electromagnética por Maxwell en la década del 60 del siglo XIX.

Se debe tener en cuenta que la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas depende de las propiedades del medio (vacío) en este caso de la permeabilidad magnética y permitividad eléctrica de acuerdo a la teoría de Maxwell. En el mecanicismo de Maxwell aparece un sentido en cierta medida metafísico en cuanto sostiene que el espacio vacío es conductor de tensiones y energías responsable de las acciones electromagnéticas, pero sin ninguna dependencia con la existencia o no de materia.

Donde la permitividad eléctrica se define como una constante física que describe como un campo eléctrico afecta y es afectado por un medio. La permitividad en el vacío $\epsilon = 8,854187817 * 10^{-12} F/m$. La permitividad está determinada por la tendencia de un material a polarizarse ante la aplicación de un campo eléctrico y de esa forma anular parcialmente el campo interno del material. Está directamente relacionada con la susceptibilidad eléctrica. Por ejemplo, en un condensador una alta permitividad hace que la misma cantidad de carga eléctrica se almacene con un campo eléctrico menor, y por ende, a un potencial menor, llevando a una mayor capacitancia del mismo.

La permitividad en el vacío ϵ se define como el coeficiente del desplazamiento eléctrico y el campo eléctrico D/E en este medio.

Por otro lado está la permeabilidad magnética la cual se define como la capacidad que posee un medio para atraer y hacer pasar a su través un campo magnético, Donde un campo magnético puede estar especificado de dos formas, por el campo magnético B y por la intensidad del campo magnético H . Las dos cantidades están relacionadas por la expresión: $B = \mu H$ donde μ es la constante de proporcionalidad (permeabilidad magnética); en el vacío, así como en materiales no magnéticos, μ tiene el valor $4\pi * 10^{-7}$ expresada en henrios por metros (H/m).

2.8. Fenomenología de la onda electromagnética de Hertz

Es de gran importancia describir cada uno de los experimentos que realizó Hertz sobre el electromagnetismo, que de alguna manera nos muestra con detalle las propiedades, el comportamiento de la onda electromagnética y el medio de propagación. Por tanto los experimentos de Hertz fueron el triunfo de la teoría de Maxwell (la predicción de dicha onda electromagnética), un importante soporte a la teoría del éter (vacío). En estos experimentos no tardó en tropezarse con dos fenómenos inesperados: la influencia de la luz ultravioleta en las chispas (efecto fotoeléctrico) y la detección de los efectos electromagnéticos a distancias superiores a las esperadas. Fue esto último lo que le animó a desentrañar el proceso electromagnético. Dio a conocer los resultados de sus experimentos en doce papeles que se publicaron entre 1887 y 1891. El propio Hertz describe en su obra *Ondas Eléctricas* el problema inicial, cómo va cambiando sus ideas, el desarrollo de los experimentos y su implicación final.

A demás los experimentos de Hertz constituyeron un hecho social e intelectual en la historia de la humanidad. En lo social estos dieron grandes aportes al desarrollo de la comunicación como lo es la televisión, la radio, et. Y en la parte intelectual los experimentos dieron resultado que la teoría de Newton, que en esa época de 1800 era la teoría moderna que existía de la física, merecía un cambio.

Hertz conocía el desarrollo matemático de la teoría del electromagnetismo de Maxwell¹² planteada de la idea de Faraday de la inducción electromagnética; pero lo que pretendía Hertz era demostrar la variación de la polarización de las sustancias dieléctricas produce un campo magnético, como lo señaló Helmholtz, la polarización de un no conductor como efecto de la inducción electromagnética de modo ésta genera una fuerza electromagnética. Según la teoría de Maxwell la polarización es la variación de la corriente, estos son efectos magnéticos. Además esto era un punto de discrepancia de la teoría de Maxwell. Mediante esta investigación o experimentación llega al planteamiento de las ondas electromagnéticas que de alguna manera fueron predichas por Maxwell.

¹² Ley de inducción de Faraday y ley de ampere.

Faraday intento realizar un experimento para demostrar la velocidad finita de las perturbaciones electromagnéticas y corroborar su teoría de campos; sin embargo Hertz no conocía estos experimentos, pero conocía todo el desarrollo matemático que Maxwell había planteado, basándose en las ideas de Faraday¹³ y el cálculo de Maxwell de la propagación de la OEM a la velocidad de la luz.

Hertz no pretendía verificar la teoría de Maxwell, no era tan ambicioso; en el año de 1879 en la academia de ciencias de Berlín, lanzaron un tema de concurso, era demostrar experimentalmente alguna relación de las fuerzas electrodinámicas y la polarización dieléctrica de los aislantes¹⁴, ya sea una fuerza electromagnética excitada mediante procesos en no conductores, es decir una polarización de los no conductores debido a la fuerza de inducción electromagnética (Hertz, 1990). Debido a este concurso, se dio a la tarea de dicha investigación, lo cual lo llevo, no solo descubrió las ondas hercianas, sino que midió su longitud, su velocidad de propagación, y demostró los fenómenos que caracterizan la onda electromagnética, reflexión, refracción y polarización; que por supuesto se explicara más adelante.

2.8.1. El descubrimiento de las oscilaciones rápidas

Los experimentos que se presentan a continuación se denominan como osciladores de Hertz, de tal modo lo que emite son ondas hercianas¹⁵, que detecta y sintoniza con diversos tipos de resonador de hasta 3m de distancia. Hertz se dio cuenta de que tenía un dispositivo capaz de detectar y producir ondas electromagnéticas predichas por Maxwell, sin embargo se puso a la tare de realizar una serie de maravillosísimos experimentos; con los cuales demostró la existencia de esta onda.

¹³ campo electromagnético e inducción electromagnética

¹⁴ Efectos electromagnéticos producidos por aisladores ver Anexos

¹⁵ Lo que hoy se conoce como ondas electromagnéticas.

Lo esencial de estos experimentos era producir corriente de altas frecuencias en un circuito primario, dotado de un chispero (para que salten chispas a través del aire); de tal modo esto lo lleva a detectar las corrientes inducidas en un circuito secundario o para-circuito como lo llamo Hertz; por ende estas se detectan observando para-chispas en otro circuito micrométrico el cual es vinculado el circuito secundario. Hertz razonó, que al saltar estas chispas se produciría un campo eléctrico variable; según Maxwell también se produciría un campo magnético variable, estos campos serian una perturbación que se debería propagar, es decir se debería producir una onda electromagnética.

Lo principal que tenía que hacer o tener en cuenta Hertz era demostrar que se podían obtener oscilaciones rápidas a altas frecuencias regulares; es decir que se ajustaran a ellas, en un circuito abierto el cual consiste en una varilla que en sus extremos tiene unas esferas o placas metálicas y están separadas por un chispero como muestra la (figura 3).

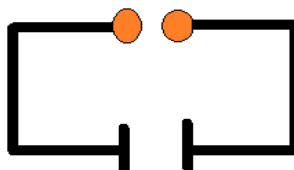


Figura 3. Circuito abierto (Segura, 2014)

Helmholtz había señalado que la descarga de la botella de Leyden¹⁶, debería ser oscilante (en 1847), fue explicada teóricamente por W. Thomson en 1853, y verificada experimentalmente por Federsen en 1858. Lo que da pasó a caracterizar la descarga como oscilante son tres elementos de circuito, que son: la resistencia, la inductancia y la

¹⁶ El primer condensador eléctrico ; donde su ecuación diferencial es: $i t = C \frac{du(t)}{d(t)}$: la cual está compuesta de un frasco de vidrio, su interior está lleno completamente de hojas de cobre o de panes de oro. En la pared exterior se halla pegada una lámina de estaño, que cubre también el fondo, aunque queda descubierta una parte de la botella (cuello de la botella). Se le adapta a la boca un corcho, una varilla encorvada en forma de gancho, en el interior esta varilla se comunica con el oro o con el cobre que llenan la botella.

capacidad. Según W. Thomson, en un condensado y en un circuito formado por dos conductores de capacidad G, resistencia R, siendo el coeficiente de inductancia L, la descarga será oscilante cuando se tenga:

$$R \ll 2 \sqrt{\frac{L}{G}}$$

Y siendo muy pequeña, como es lo general, la resistencia R respecto a la inductancia L, el tiempo de una oscilación será (Ducretet):

$$t = 2\pi \sqrt{CL}$$

Sin embargo Hertz tenía la idea de utilizar esta descarga para generar el campo eléctrico externo.

Las descargas oscilantes servían para inducir una corriente a un circuito secundario abierto cercano al primario (carrete de inducción abierto). Al oscilar una corriente por el circuito secundario, se cargan positivamente pero primero una y luego la otra. Si se introduce un dieléctrico entre las esferas cambiaría periódicamente de polarización¹⁷ bajo la acción del campo eléctrico externo. Si se compara el efecto de inducción con o sin él dieléctrico de todas formas se puede detectar el efecto de inducción de polarización. ¿Pero cómo demostró Hertz dichas oscilaciones?, Y ¿por qué los dieléctricos presentan propiedades magnéticas y afectan las oscilaciones?

Hertz utilizó las espirales de Ríes o Knochenhaver para poder demostrar la inducción electromagnética; consistía en dos carretes planos, cada uno de ellos dotado por un espirómetro para determinar el paso de corriente, al descargarse un carrete, a través de uno de los carretes se inducirá corriente al carrete secundario (Berkson, 2008).

En los dos siguientes montajes Hertz concibe que la corriente de altísimas frecuencias del circuito primario, se propague a enorme velocidades a un para- circuito

¹⁷ Según Hertz es una propiedad de la onda de luz, por lo que las oscilaciones se realizan en una única dirección transversal; por ende las oscilaciones eléctricas se realizan en una dirección y las oscilaciones magnéticas se realizan en otra.

rectangular eléctricamente conectado al primario, como se pueden evidenciar en las figuras 4 y 5.

1^{ER} Montaje

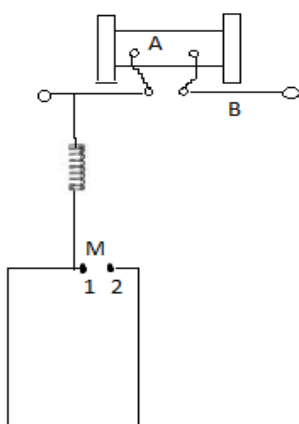


Figura 4. Oscilaciones rápidas. Modificada (Hertz, 1990).

Donde A es un inductor, B es descargador y M el micrómetro

El carrete de inducción está basado en el experimento de Faraday sobre el siguiente efecto: dos cables se enrollan en torno a un tubo, y el secundario posee un número mayor de vueltas, cuando se hace pasar una corriente por el primario, las líneas de fuerza emergentes cortan al circuito secundario. Como el secundario tiene mucho más vueltas que el primario, se induce una corriente de mayor voltaje que la que pasa por el primario. En B hay un dispositivo, el espinterómetro, que mide la longitud de la chispa que se producen en este circuito.

En este experimento Hertz nos está familiarizando con el circuito primario que es también un oscilador, y el inductor que lo excita es el mismo carrete de Ruhmkorff¹⁸. De tal modo que en el chispero han de saltar chispas eficaces, que produzcan corriente¹⁹ de alta frecuencia intensa.

Tal y como está el circuito anterior se observa una chispa muy intensa, por ende este resultado da la idea de que hay un onda a lo largo del cable. Donde una parte del pulso llega al espirómetro antes de que la otra tenga tiempo de dar la vuelta e igualar la diferencia de potencial. De tal modo esto no prueba que se produzcan oscilaciones regulares. En el siguiente montaje fue donde Hertz demostró la regularidad de las oscilaciones.

En el momento de la descarga, se presenta violentos movimientos eléctricos en todos los conductores que están con el circuito primario; también muestra, más claramente con los movimientos tan rápidos, el tiempo empleado por dichas ondas eléctricas en atravesar conductores metálicos cortos.

Respecto a las oscilaciones de los aparatos que deberían ser utilizados para producir las oscilaciones eléctricas²⁰, Hertz pudo observar que los conductores de gran superficie como la botella de Leyden tienen mucha capacidad eléctrica, ya que no originarían descargas tan rápidas como Hertz desearía tener en sus experiencias. Son necesaria las descargas violentas para alcanzar para –chispas de periodos, cortos es decir de un gran número de vibraciones por segundo; para todos los experimento Hertz utilizo inductorio de Ruhmkorff de 52 cm de largo y 20 cm de diámetro, equipado con interruptor de mercurio. Inductores más pequeños daban cualitativamente los mismos resultados, pero la para-chispa era más corta, y por consiguiente sus diferencias más difíciles de observar, lo mismo vale de la descarga de la botella de Leyden o de baterías que fueron colocadas en lugar de inducción. La chispa resulta más eficaz únicamente entre dos

¹⁸ para todos los experimentos utilizo este carrete de 52cm de largo y 20cm de diámetro.

¹⁹ Corriente alterne que es la que se requiere para producir y entretener las oscilaciones propias del oscilador de Hertz de frecuencias muy altas.

²⁰ No solo son oscilaciones eléctricas, sino que también se producen oscilaciones magnéticas.

bolas, y ellas no deben estar ni demasiado alejadas ni tampoco tan juntas. Si es más corta de 0.5 cm, las para-chispas son débiles, y si es más larga 1.5 cm, desaparece casi totalmente (Hertz, 1990).

En este experimento nos muestre el para circuito, donde con el aspecto y el ruido de las chispas se puede deducir su capacidad de excitar a este; las chispas eficaces son brillantes y blancas. Una chispa es condición esencial del descargador para que se obtenga para-chispa (los conceptos para-circuito, para-chispa, inductor etc. Se muestran en el glosario).

2^{do} Montaje

En este experimento se dice que hay ondas estacionarias²¹ debido a que las oscilaciones, no presentan chispa, porque Hertz modifica el circuito secundario es decir el para-circuito como se ve en la figura (5). Donde lo que influye no es su resistencia sino su geometría; en particular su capacidad y su inducción eléctrica, las únicas magnitudes de que depende el periodo de oscilación propia. Dentro de esta geometría el para-circuito, estudia el influjo del punto de contacto con el oscilador. Así es como Hertz descubre el punto de indiferencia, para el que, por pura simetría, no aparece ninguna diferencia de potencial entre las bolitas del micrómetro, y tampoco saltan chispas.

²¹ Ondas eléctricas estacionarias; Anexos.

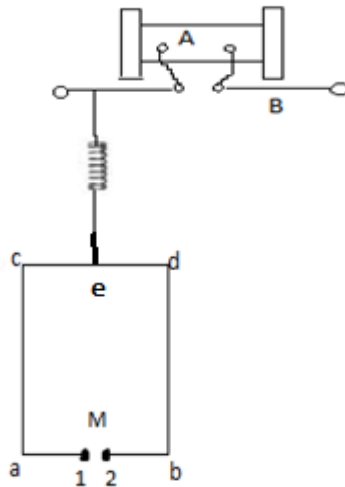


Figura 5. Oscilaciones regulares. Modificada (Hertz, 1990).

Las ondas no mueren al precipitarse por primera vez hacia a y b, si no que se reflejan y recorren el circuito lateral varias veces, incluso muchas veces, dando lugar a ondas estacionarias en el circuito. Si las trayectorias eca y edb son iguales, las ondas reflejadas llegan a 1 y 2 simultáneamente; es decir que llegan a los mismo punto en iguales tiempos. Si el contacto del para-circuito, de forma que los cambios de ambas bolas sean iguales, entonces toda alteración que llegue a través del alambre de conexión, llegara a ambas bolas con igual fase, es decir, no aparece ninguna diferencia de potencial.

2.8.2. Inducción de corrientes abiertas

Hertz encontró la existencia de las oscilaciones en más de un lugar, demostró que la chispa no dependía apenas de la resistencia de los cables, como era de esperar en el caso de las oscilaciones rápidas, las ondas que se transmiten por el cable apenas son afectadas por variaciones de la resistencia. Se convenció aún más de la existencia de las oscilaciones cambiando el montaje anterior, añadiendo un trozo de cable a uno de los

espinterómetro, aumenta mucho el chisporroteo, pero no altera el tiempo de llegada a las dos mitades del pulso original.

Es así que se presenta la inducción de un oscilador sobre un resonador separados entre sí, sin embargo es donde se pueden ver las primeras ondas hercianas. Demuestra que existe una inducción de corriente, de un circuito a otro, donde la acción inductiva es de carácter electrodinámico, que es causado por las altas frecuencias que circulan por el alambre. Para conseguir una fuerte inducción, Hertz aumento la capacidad del circuito de descarga y abre los extremos del circuito lateral como se muestra en la figura 6 (a). Los cuerpos c y c' son conductores metálicos que se colocan en los extremos de los alambres para aumentar la capacidad. De tal manera que con este experimento fue como demostró los efectos inductivos, debido a la corriente abierta en que circula desde k y h .

La descarga se efectúa entonces por una chispa que estallara entre 1 y 2, cuando la diferencia de potencial entre las esferas alcance un valor suficiente. Esta chispa juega el papel de un conductor que liga las esferas, con la diferencia de que una vez la descarga efectuada, puede cargarse de nuevo y descargarse en seguida, obteniéndose entre los puntos 1 y 2 una serie de descargas oscilantes que se suceden sin interrupción, mientras el generador funcione (Ducretet).

3^{er} Montaje

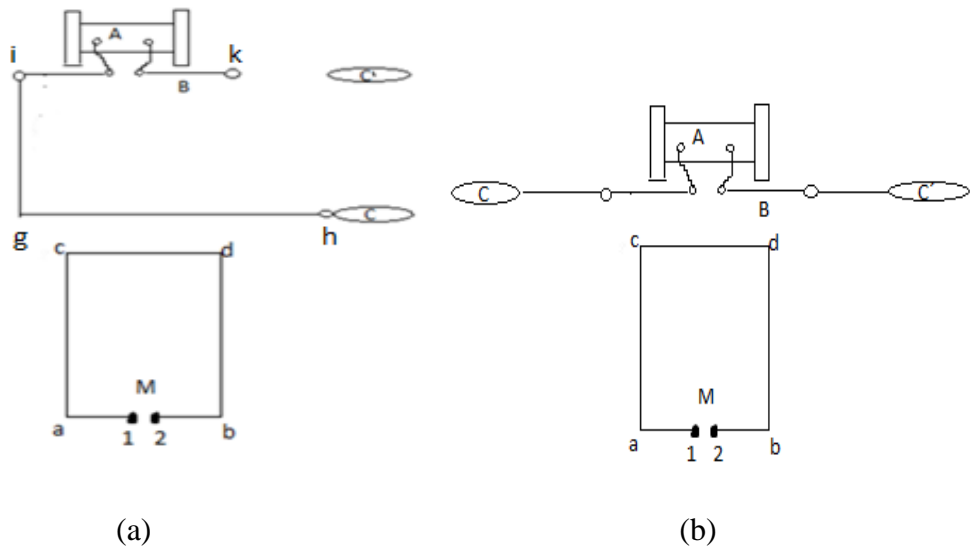


Figura 6. Inducción de corrientes abiertas. Modificad (Hertz, 1990).

Al modificar el montaje, acortando y enderezando en circuito abierto, como se ve en la figura 6(b), demuestra el carácter oscilatorio de la inducción de la corriente abierta. Para poder demostrar las vibraciones rápidas es decir las oscilaciones. En este experimento debería aparecer el fenómeno de resonancia (más adelante se explica este fenómeno), para las descargas oscilatorias entre la corriente inducida e inductora. Ya que el circuito receptor debe estar sintonizado con la frecuencia de la fuerza electromotriz variable que actúa sobre él.

La frecuencia natural de un circuito oscilante depende de su coeficiente de autoinducción y de su capacidad electrostática; estas magnitudes dependen de la longitud del cable, es así como se puede sintonizarse el circuito secundario.

Si el circuito secundario no está sintonizado, requiere de una mayor fuerza electromotriz para producir las vibraciones; Hertz sintonizo los circuitos a la misma frecuencia ($C C'$) y consiguió la ansiada chispa en M, esto se debía al fenómeno de resonancia. Cuando varía la longitud del circuito, la longitud de la onda decrece

rápidamente la chispa. De alguna y otra manera este experimento no solo muestre el fenómeno de resonancia, sino también muestra la acción mutua entre dos corrientes abiertas.

Lo fundamental de su evolución conceptual está en ir pasando de una mentalidad electrodinámica (según la tradición de Ampere, Weber y Helmholtz) a una mentalidad de campo electromagnético (según la tradición de Faraday y Maxwell). Para la electrodinámica lo principal, se debe a los fenómenos eléctricos, son las cargas o las corrientes o cargas en movimiento, mientras que para los campos electromagnéticos lo es todo el espacio, aun el espacio vacío. El esfuerzo de Hertz consistía en sacar estos fenómenos de los conductores, en los que las cargas se mueven libremente, al espacio libre de cargas. Y realizó esa transformación pasando por los materiales dieléctricos, en los que demuestra la existencia de corrientes de desplazamiento, y concibiendo el espacio vacío como un dieléctrico.

2.8.3. Fenómeno de resonancia.

Empleo Hertz como receptor un circuito conductor, abierto en un punto, formando un anillo o un rectángulo y terminado sus dos extremos en dos esferas 1 y 2 muy próximas la una a la otra. Si se dispone este circuito, que constituye el resonador de Hertz, próximo al circuito primario en acción, se producen chispas en el punto abierto del circuito metálico. Por supuesto esta chispa muestra acción eléctrica²². el receptor puede considerarse como un condensador, al colocarlo dentro del espacio a donde alcanza la acción del circuito primario, espacio que se llama campo hertziano, las perturbaciones ligeras producen fuerzas electromotrices²³ de inducción que carga el condensador, y cuando la diferencia de potencias es muy grande, ve la descarga entre los terminales 1y 2.

²² Es decir que el excitador es el que la produce y el resonador la revela.

²³ Es un generador (circuito primario) que produce un campo electromagnético, de tal modo que se produce un movimiento de cargas por el circuito, para ello se necesita de una diferencia de potencial.

Este fenómeno se da entre el circuito inductor (primario) e inducido (secundario); por ende lo conciben como la sintonización del receptor con las ondas emitidas por el oscilador. Por otro lado se dice que coinciden los periodos de oscilación propios del circuito inductor e inducido.

La existencia de oscilaciones regulares (movimiento periódico), pero la existencia de dichas oscilaciones quedaría probada, si se consiguiera demostrar relaciones de resonancia entre dos circuitos separados en interacción, teniendo en cuenta el principio de resonancia, una corriente regular oscilante, tiene que ejercer una acción inductiva mucho mayor sobre un circuito del mismo periodo de oscilación, que sobre un circuito de periodo poco diferente. Por consiguiente, si dos circuitos cuyos periodos son aproximadamente iguales, se hace actuar uno sobre otro y después se hace variar continuamente la capacidad o el auto-potencial (autoinducción) y con ello el periodo de oscilación de uno de ellos, entonces tiene que manifestarse la resonancia en el hecho de que, para determinados valores de estas magnitudes, la acción inductiva, resulta aún más intensa que para los valores próximos por uno y otro lado (Ducretet).

En la (figura 6) se muestra estos montajes para mirar como variaban los fenómenos al variar la resistencia de conductor secundario. Con este propósito el alambre cd del rectángulo fue remplazado por varios alambres delgados de cobre y metal blanco (plata), con lo cual la resistencia del circuito secundario aumentaba, hasta cien veces más, esta variación tenía un pequeño influjo en la longitud de las chispas y absolutamente ningún influjo en la aparición de la resonancia, es decir en el periodo de oscilación. El alambre de cd fue rodeado por un tubo de hierro bien situado por un alambre de hierro. Ninguno de esos cambios tuvo un influjo de algún modo constatable. También se supone que el magnetismo del hierro no es capaz de seguir oscilaciones muy rápidas y se comporta diferente respecto a ellas²⁴.

²⁴ Corroborar que la resonancia, no depende de la resistencia eléctrica ni de las propiedades eléctricas del secundario.

Para que se entienda este fenómeno se hace análogo a las ondas mecánicas, por ejemplo las vibraciones producidas por un diapasón en otro cercano, y que este afinado a la misma nota. Lo mismo debe suceder con la inducción electromagnética.

2.8.4. La idea de las ondas electromagnéticas.

Una prueba más directa para demostrar la existencia de ondas electromagnéticas, en particular su demostración de la inducción de corrientes no cerradas con circuitos resonantes.

Como se muestra en la figura 7, el bloque (dielectrico) entre las dos piezas de metal aumenta la capacidad. Al oscilar la corriente, el campo que actua sobre el bloque cambia muy rapidamente de sentido, con lo cual varia rapidamente la polarizacion de bloque, el circuito detector esta situado como en el montaje 3, en el plano del oscilador primario. En esta posicion, las lineas magneticas producidas por el dielectrico atravesarian el area encerrada por el circuito, con lo cual el circuito era sensible a los efectos inductivos del campo variable. El circuito detector esta sintonizado, para que entrara en resonancia con el oscilador primario, siendo asi mucho mas sensible que un circuito ordinario. Cuando hertz realizo el experimento, descubrio que las chispas del circuito detector tenian la misma intensidad, ya que se pensaba lo contrario debido a la corriente de desplazamiento por el aire, por su capacidad inductiva.

Hertz pensó que se podía producir interferencia con dos ondas electromagnéticas cerca del aparato, utilizando una segunda fuente de onda. Como los fenómenos de interferencia están ligados a los fenómenos ondulatorios, de esta manera quedaría demostrada la existencia de las ondas electromagnéticas.

A Hertz le sorprendió el continuo aumento de la distancia a la cual la acción era detectable, es decir que el campo magnético se observaba por separado del campo eléctrico, la idea más común era que las fuerzas eléctricas decrecían según la ley de newton y tendían rápidamente a cero.

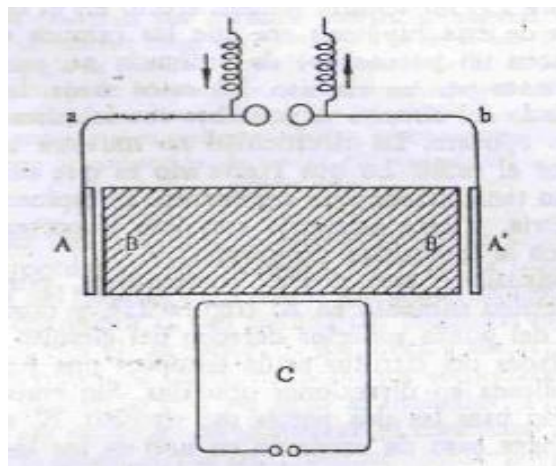


Figura 7. La idea de onda electromagnética. (Hertz, 1990).

El espacio libre de materia por así decirlo, actúa como un material dieléctrico; es decir la corriente de desplazamiento en el vacío crea un campo magnético. Lo dicho anteriormente recoge la esencia y especial importancia de la concepción de Faraday y la de Maxwell.

Hertz ideó un nuevo experimento de interferencia, el cual lo llevó a comparar la velocidad de las perturbaciones eléctricas que provienen de un oscilador con la velocidad de una onda simultáneamente enviada por un cable²⁵, según la teoría, la onda que viaja por el cable debería propagarse a la velocidad de la luz, y Hertz logró comparar las velocidades de las ondas en el aire²⁶ y en el cable utilizando como detector sus circuitos sintonizados. Para esto se requiere la dirección de los campos eléctricos y magnéticos; realizó esta investigación de acuerdo a la cuerda pulsante²⁷.

²⁵ Propagación de las ondas electromagnéticas en Anexos.

²⁶ Las ondas electromagnéticas en el aire y su reflexión en Anexos.

²⁷ Guarda una relación entre la armonía del campo eléctrico y magnético.

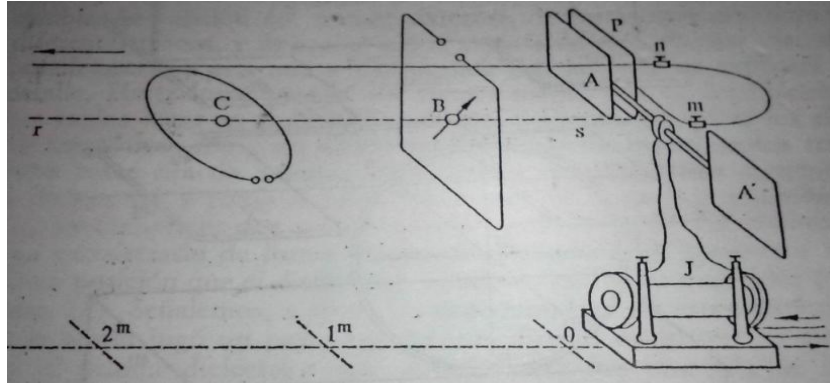


Figura 8. (Berkson, 2008).

En la figura 8 se representa el dispositivo que crea un campo y emitir corriente a lo largo de un cable de forma simultánea. Según la teoría, toda onda eléctrica debe viajar a la velocidad de la luz, por tanto una onda que tenga el mismo periodo de oscilación que la máquina y que se propague a la velocidad de la luz debe viajar por el cable mientras el circuito abierto está vibrando. Esta onda eléctrica hará que en alguna parte del cable sea más positiva y en otra más negativa, produciéndose un campo eléctrico de intensidad variable que se mueven por el cable, es obvio que junto a campo eléctrico variable hay en el cable un campo magnético cuyas líneas de fuerza los rodean.

La interpretación que Hertz daba a estos experimentos confirmaba así la existencia de onda propagándose a la velocidad de la luz, como predecía la teoría de Maxwell.

2.8.5. La velocidad de propagación de las acciones electromagnéticas es finita

La teoría de Maxwell era la que tenía más posibilidades, o la que estaba más cerca de ser la correcta. Una forma de determinar en qué medida era correcta la teoría de Maxwell era medir la velocidad de propagación de las perturbaciones eléctricas. Este es el objetivo que se propuso obtener Hertz. El método que se propone usar es primero, medir la velocidad de las perturbaciones (ondas) que viajan por un hilo (cable) midiendo la distancia entre dos nodos en la onda estacionaria que se aparece al combinarse la onda directa con la onda reflejada en el extremo del hilo, y relacionar esta distancia con la frecuencia (Maxwell predice la velocidad de la luz), y segundo, eliminar la onda

reflejada en el hilo para obtener una onda progresiva, y analizar simultáneamente con el circuito secundario la onda que ha viajado por el hilo y la onda que ha viajado por el aire. Si las velocidades son las mismas (como predice la teoría de Maxwell) la fase ha de ser la misma en todo su recorrido y no debe de aparecer ningún patrón de interferencias.

Para medir la velocidad de las ondas en el hilo Hertz se aprovechó de las ondas estacionarias que aparecen en un hilo cuando se deja su extremo libre. Recorriendo este hilo (12 m) con su aro no tuvo ningún problema para encontrar los nodos donde la señal era nula. La velocidad se obtiene simplemente al relacionar la distancia entre dos nodos y la frecuencia de la onda²⁸. Aquí Hertz cometió un error al calcular la frecuencia, calculó una frecuencia inferior a la real, y por tanto dedujo una velocidad de propagación en los hilos de 200.000 km/s.

Para medir la velocidad de las ondas en el aire Hertz alargó el hilo, lo hizo salir por una ventana, y lo hizo terminar a tierra tras recorrer 60 m. De esta forma eliminaba la onda reflejada y no aparecía ninguna indicación de onda estacionaria en el hilo. Después examinó con él para-circuito el espacio cercano al hilo donde la intensidad de la onda que viaja por el hilo y la onda que viaja por el aire han de ser aproximadamente iguales. Desafortunadamente se encontraba muy cerca una estufa de hierro que debió interferir seriamente con los experimentos, pero en esos momentos Hertz ignoraba los efectos de las masas conductoras cercanas. El resultado del experimento fue que obtuvo un patrón de interferencias que cuadraba con una velocidad de las ondas en el aire de 320.000 km/s. Hertz había demostrado sin duda alguna que no existía la acción instantánea a distancia (velocidad infinita), y se convenció que la teoría de Maxwell era la que estaba más cerca de la verdad. En las conclusiones finales de estos experimentos Hertz incluye las siguientes palabras, que indican los experimentos que planea para el futuro: Hay numerosas razones para creer que la ondas transversales de la luz son ondas electromagnéticas; se tiene un firme fundamento de esta hipótesis al demostrar la existencia en el espacio de ondas electromagnéticas transversales que se propagan con

²⁸ obtenida por cálculo a partir de los datos del circuito oscilador.

una velocidad similar a la velocidad de la luz. Y un método por el cual se podría confirmar o rechazar este criterio importante. Ahora es posible estudiar experimentalmente las propiedades de las ondas electromagnéticas transversales, y compararlas con las propiedades de las ondas de la luz Hertz siempre estuvo preocupado por el resultado de este experimento y lo repitió numerosas veces, cada vez en condiciones más controladas y empleando diversas longitudes de onda. Con oscilaciones de una longitud de onda de 24 cm. y retirando todos los objetos metálicos de la habitación (estufa, tuberías de gas y quemadores), obtuvo una velocidad de propagación en los hilos metálicos rectos y en el aire de 280.000 km/s, muy cercana a la velocidad de la luz que predice la teoría de Maxwell.

2.8.5. Comprobación experimental de los fenómenos que caracterizan las ondas hertzianas.

En este apartado se describe las experiencias que comprueban los fenómenos que caracterizan las ondas hertzianas: polarización, reflexión, refracción, difracción e interferencia.

2.8.6.1. Polarización:

Hertz describe su original pantalla de alambres, que deja pasar el rayo de campo eléctrico perpendicular a los alambres y refleja el campo eléctrico paralelo. Esta pantalla se comporta como una lámina de turmalina respecto a la luz polarizada. La colocación de la pantalla con los alambres a 45° respecto al campo eléctrico, ilustra maravillosamente el campo de composición y descomposición de amplitudes luminosas. Demuestra la polarización mediante un experimento; gira un espejo receptor, alrededor del eje del rayo, hasta su línea focal, por consiguiente también el conductor secundario está en posición horizontal, entonces las chispas secundarias desaparecen cada vez más y más, y para la posición cruzada de ambas líneas focales, no se obtiene chispa, e incluso acercando los espejos a una pequeña distancia. Un espejo se comporta como

polarizador y el otro como analizador, de un aparato de polarización. Pero si colocaba la pantalla frente al rayo de tal manera que sus alambres fueran paralelos a las líneas focales, entonces detenía completamente el rayo. En relación a la energía que pasa alrededor de ella, se comporta la pantalla, frente al rayo, exactamente como una lámina de turmalina²⁹ frente a un rayo óptico rectilíneamente polarizado. Pero si se coloca el marco de madera de forma que los alambres quedaran orientados en una de las dos posibles direcciones que forman un ángulo de 45° al introducir la pantalla el circuito secundario se ilumina inmediatamente. Evidentemente la pantalla descompone la oscilación incidente en dos componentes, y deja pasar solo a la que es perpendicular a la dirección de sus alambres. Esta componente está inclinada a 45° respecto a su línea focal del segundo espejo, y es capaz de ser descompuesta por el espejo para actuar por el conductor secundario (Hertz, 1990).

Según Hertz es una propiedad de la onda de luz, por lo que las oscilaciones se realizan en una única dirección transversal; por ende las oscilaciones eléctricas se realizan en una dirección y las oscilaciones magnéticas se realizan en otra.

2.8.6.2. Reflexión:

Este fenómeno se da a la interferencia que da lugar a ondas estacionarias y a la construcción de espejos parabólicos. Hertz colocó en un espacio grande los dos espejos cóncavos, uno cerca del otro, de forma que sus aberturas se dirigieran al mismo lado y que sus ejes convergerán en un punto que estaba a unos tres 3m delante de ellos, el chispero del espejo receptor permanecía oscuro. Luego Hertz coloca una ampara³⁰ en la intersección de los ejes de forma que fuese perpendicular a la bisectriz de los ejes. Obtuvo una viva corriente de chispas, originada del rayo reflector de la mampara. La corriente de chispas fue extinguida en cuanto la mampara fue girada alrededor de un eje vertical en uno 15° hacia un lado u otro de su posición correcta; esta reflexión es regular

²⁹ Lámina de cristal del orden de un milímetro de espesor, se utiliza en óptica como analizador y polarizador. Cortada según la dirección del eje óptico, va absorbiendo uno de los rayos, en concreto del ordinario. La luz que atraviesa el espesor del milímetro, representa la polarización de rayo ordinario.

³⁰ Lámina delgada de zinc, de 2m de alto y 2m de ancho.

y no difusa. Si se alejaba la mampara de los espejos de forma que los ejes de estos últimos siguieran convergiendo hacia la mampara, las chispas disminuían muy lentamente, puede detectar chispas incluso cuando la chispa estaba a 10m de los espejos, por tanto las ondas debían de recorrer 20m de camino.

Para producir una reflexión del rayo a un ángulo distinto de cero, dirigió el rayo a una pared lateral, la cual tenía una puerta. En la habitación contigua a la que conducía la puerta colocó el espejo cóncavo receptor, de tal manera que su eje óptico atravesara el centro de la puerta e intersectara perpendicularmente a la dirección del rayo. Si el punto de intersección se colocó verticalmente a la mampara conductora plana, de modo que quedo formando un ángulo de 45° tanto con el rayo y el eje receptor, entonces aparecía en el conductor secundario una corriente de chispas que no era interrumpida al cerrar la puerta. Es decir que es una reflexión regular y los ángulos de incidencia y reflexión son iguales entre sí.

2.8.6.3. Refracción:

para demostrar este fenómeno Hertz utiliza dos medios, el aire y un prisma³¹, el prisma lo colocó sobre una base, de modo que su centro de su arista de refracción estuviese a la misma altura de los chisperos (primarios y secundarios), el espejo cóncavo emisor fue colocado a unos 2.6m del prisma frente a una superficie refractante, de tal manera que el rayo apuntaba al centro del prisma, y corta la superficie refractante formando con ella un ángulo de 65° hacia el lado de la superficie posterior, junto a la arista refractante del prisma y junto al lado opuesto fueron colocadas dos pantallas conductoras las cuales impedía al rayo todo otro camino que no fuese el que atraviesa el prisma. En particular este fenómeno experimenta el cambio de dirección de propagación de la luz cuando atraviesa oblicuamente la superficie de separación de dos medios transparentes de distinta naturaleza.

³¹ Es una especie de masa asfáltica, era un triángulo isósceles con lados de 1.2m y un ángulo de refracción de unos 30° , la altura del prisma fue de 1.5m.

2.8.6.4. Difracción:

Es un fenómeno óptico, que consiste en la división de un rayo de luz, al pasar junto a borde de cuerpos opacos, como pantallas, rendijas, redes de difracción, etc. La superposición en un mismo punto de ondas elementales provenientes de diferentes puntos del cuerpo perturbador produce interferencias, con máxima y mínima luminosidad, en vez de luz y sombra. Hertz no logro detectar este fenómeno con el rayo de onda hertziana.

2.8.6.5. Interferencia:

Las ondas electromagnéticas luminosa es un fenómeno físico que se explica a partir del modelo ondulatorio de la luz, en el cual; la luz se considera como la perturbación de dos campos³² acoplados que oscilan en planos perpendiculares y cuya propagación se realiza en una dirección perpendicular a la oscilación de propagación de los dos campos de la onda electromagnética. En este fenómeno las ondas luminosas procedentes de dos focos coherente (de mismo periodo y de diferentes fases constato en el tiempo) se suponen constructivamente en los puntos en que ambas llegan con la misma fase y destructivamente las que llegan con fase opuesta, el propio Hertz dice, este fenómeno es el fundamento de las ondas estacionarias, que por supuesto el detecto con su onda electromagnética y de los fenómenos de difracción que desafortunadamente no logro detectar con ella.

³² Campo eléctrico y campo magnético.

CAPÍTULO III

3. Reflexión del aspecto pedagógico

Este documento está planteado para la ayuda, y además aporta elementos al estudiante para que de alguna manera le queden claros los conceptos y fenómenos en relación con OEM.

3.1. Re-contextualización de saberes

La importancia de la epistemología y la historia de la física es esencial para favorecer el aprendizaje más eficiente y acorde con la naturaleza. La historia de las ciencias y sus implicaciones en la enseñanza de las mismas es una línea de investigación e innovación en la educación científica. En particular, se ignoran los aspectos históricos en la imagen de la física que se trasmite y cuando se utilizan, por así decirlo, no se especifican bien, no quedan claros. Los estudiantes y los maestros tenemos una imagen deformada de cómo se construyen y evolucionan los conceptos científicos.

En la enseñanza usual de la física la utilización de recursos históricos es escasa y se suele concretar en el uso explícito de algunos aspectos de la historia interna de las ciencias, como biografías anécdotas y grandes inventos de la técnica, y la historia de algunos conceptos o modelos solo en algunos capítulos; como por ejemplo, la naturaleza de la luz o la estructura del átomo. La historia de las ciencias en particular, ha recobrado un especial reconocimiento en el ámbito de la formación de maestros de la ciencia en especial de la física; así como en la enseñanza de la física.

En el ámbito de la formación de maestros de ciencia se ha visto la historia y la filosofía de las ciencias como una forma de incidir sobre la imagen que la ciencia tienen los maestros; dado el significativo papel que esta juega en su orientación de su tarea pedagógica. En general la historia y la epistemología de las ciencias permite la reflexión sobre el que hacer y el conocimiento científico.

Por otro lado se le exige al profesor de ciencias obviamente de tener una buena formación en la disciplina en este caso de física que se va a enseñar y en pedagogía; también se le exige tener un buen conocimiento en una buena formación e física o en la ciencia que ha de enseñarse. La formación adicional como la pedagogía³³, que de alguna manera le permite, entender y darle sentido a su labor así como desarrollarla adecuadamente. El maestro de física o de esta disciplina debe apropiarse de la misma; de manera rigurosa. Es decir que el saber no debe estar ausente a ese saber.

La mayoría de los casos se considera que la gran dificultad en la enseñanza de la física está en que la comprensión lograda por los estudiantes de los conceptos, leyes o teorías que se enseñan no les permite ya sea solucionar correctamente los ejercicios o problemas a abordar. Sin embargo, en otros casos se va más allá de la comprensión y su uso adecuado de la teoría y se destaca como una gran dificultad el excesivo énfasis que se hace en la formulación matemática de la física, que hace que la comprensión de la física se confunda con la habilidad de interpretar las expresiones matemáticas, manipular y hacer uso de ellas para desarrollar los ejercicios, y que se deje de lado el análisis y la lógica conceptual de los planteamientos teóricos.

Es de gran importancia que la enseñanza de la física, se centre en las teorías físicas; ya que esta permite ya una postura aproximada y una imagen de la física muy distinta. En particular conocer una teoría permite, conocer la concepción del mundo físico que involucra y la forma como se puede, a partir de ella derivar los diferentes conceptos y leyes de la teoría con los que nos damos cuenta de los fenómenos inscritos en el dominio de esta, y establecer los nexos con la experiencia sensible. Es así, conocer la física, significa conocer los problemas y el desarrollo que se han planteado de la concepción de la física a lo largo de la historia de esta, las condiciones en que tales problemas se han planteado, las respuestas y forma de abordarlos que se han elaborado, la forma como evolucionan los conceptos los elementos comunes y las diferencias básicas entre las diferentes teorías etc. La dinámica de los problemas y conceptos rompe con la organización de las ciencias en teorías, la física como actividad comienza a plantearse

³³ Arte o ciencia de enseñar.

como un objeto de estudio, que para los docentes y estudiantes de física es de gran relevancia; el carácter dinámico e histórico adquiere una gran importancia.

Si bien, el carácter de la historia de la física implica dejar de lado la idea muy generalizada, hay verdades absolutas y si las hay manejan un dominio restringido; que si se les da solución a estas verdades cada vez son más complejas.

En este orden de ideas, el examen de la historia de las ciencias cobra especial relevancias en el ámbito de la formación de física de los docentes en física. Pero, mirar la historia es preguntarse el pasado por el presente, y en consecuencia implica, reconstruir el pasado y viceversa. De este modo la historia debe ser permanentemente reconstruida, lo mismo que las líneas de desarrollo que se pueden establecer. Pero al respecto es importante tener en cuenta las lecturas que se tienen del pasado, pues estas dependen de las posturas que se asumen al presente y por tanto de las intencionalidades que animan su reconstrucción (Ayala, 2006)

(Caicedo) Ven los escritos de dejados por Bernstein una idea clave que puede adoptar y utilizar, desarrollando en forma admirable la perspectiva de la educación como re-contextualización afinales de la década de los noventa. Es decir, el conocimiento originalmente en la comunidad científica deben ser asimilados por los estudiantes, y por tanto adoptarse a los contextos culturales en los cuales van hacer apropiados, funciones e incluso a la estructura interna del cuerpo del conocimiento.

(Belendez, 2008)Re-contextualizar es situar, insertar, articular un conocimiento, de manera significativa, en un nuevo contexto; lo cual implica la construcción de un nuevo discurso, con finalidades funciones y estructuras propias, que deliberadamente dejan de lado el discurso original, pero que de alguna manera lo toman como base.

En particular esto es lo que nos lleva a contemplar el profesor como el principal agente re-contextualizador, porque es esa labor la que lo hace reconstruir conocimiento, significado, lenguaje, códigos y prácticas de acuerdo de quienes aprenden (estudiantes de física). Igualmente, a pesar de la re-contextualizaciones la universidad surge como

condición indispensable para la enseñanza, por la intencionalidad que atraviesan los sujetos en este espacio más en el área de las ciencias y las particularidades en el proceso de transformación o adaptación de conocimiento.

Conocer una disciplina (física) significa saber acerca de su contenido y su funcionamiento. Especialmente, el contenido de las ciencias se le ha asociado generalmente con el conocimiento de sus problemas, conceptos, teorías, leyes y reglas de la ciencia, considerándolos como hechos o datos dados. Pero los nuevos desarrollos pedagógicos de la enseñanza, aprendizaje y evaluación de las ciencias muestran que el dominio de los contenidos científicos es un asunto complejo, que no se puede reducir solamente a conceptos dados como datos; ya que no existe una verdad absoluta.

De acuerdo con Millar y Osborne (citados por Adurís-Bravo, Izquierdo & Estany, 2002) en la actual didáctica de las ciencias existe un reconocimiento generalizado en que la formación de filosofía y la historia de las ciencias debería ser uno de los componentes fundamentales de la alfabetización científica general de la población que esté involucrada con esta área. Este reconocimiento se ha traducido en la transformación de los currículos de ciencia de muchos países y la introducción de la naturaleza de la ciencia en los programas para maestros en formación inicial.

Para Adurís Bravo (2005) además de saber ciencia (física), la alfabetización científica involucra saber sobre la ciencia: qué son y cómo se elaboran, que características las diferencian de las otras producciones, como cambian en el tiempo, como influyen y como son influenciadas por la sociedad y la cultura. Un profesor de formación inicial o continuada que acceda al conocimiento de aspectos fundamentales de la naturaleza de la ciencia, podrá explicar, comunicar y estructurar mejor sus ideas y de este modo mejorar su desempeño profesional.

Por otro lado hay una gran dificultad en el uso de los modelos de los libros de texto. La transmisión del conocimiento científico se ha vuelto ahora muy uniforme. Se apoya en los libros de texto de la enseñanza superior, lo cual implica que los estudiantes de física se aprendan las teorías como pasa en las conferencias. Son pocos los libros que se

detienen a considerar las nociones que integran a los científicos en su época y a sus contemporáneos, la mayoría reduce los problemas complejos a problemas sencillos para los que ya hay solución.

Es así, como, se sabe que los contenidos de libros de texto suele transferirse a las aulas de modo acrítico, es por esto que no abundan los resultados de investigación sobre la competencia de los docentes para desenvolverse con el manejo de los modelos de los libros de texto.

Bien, esto no permite que el sujeto construya su conocimiento, sino lo contrario que de alguna manera solo memorice, ecuaciones, conceptos, etc.

Por otro lado el mundo físico y los fenómenos han sido, históricamente abordados en general de múltiples maneras, es decir desde diferentes esquemas de organización, estos esquemas de organización se vuelven hegemónicos en algunos casos en periodos muy largo o sino son abandonados en otros casos y muchas veces son retomados posteriormente, dependiendo de las condiciones y exigencias de los contextos específicos de la importancia.

En el caso del electromagnetismo, por su parte, es posible distinguir dos perspectivas de análisis de los fenómenos que no solo son diferentes sino opuestos, en una la acción entre los cuerpos, es interpretada como una acción directa y a distancia; todo cambio se atribuye a los cuerpos que es percibida por los sentidos es atribuida al estado en que se encuentra el medio en el cual están inmersos; el estado del medio y sus cambios es, ahora el objeto de análisis, usualmente la distinción entre estas dos perspectivas es omitida, y se pasa de una perspectiva a otra sin hacerlo explícito, produciendo imágenes contradictorias y toda una serie de dificultades a tratar de comprender las diversas afirmaciones que se hacen sobre los fenómenos electromagnéticos (Ayala, 2006). En el caso de la onda electromagnética se suele presentar la misma situación; ya que no se presenta la relación o diferenciación entre las ondas mecánicas y onda electromagnética y esto permite confusión entre estos dos fenómenos.

Así, bien se puede asegurar que la teoría electromagnética tiene con la mecánica una relación de constitución; es importante tener en cuenta que el referente en la organización de los fenómenos electromagnéticos desde una perspectiva de campos es la mecánica de medios continuos y no la mecánica de partículas, esto pone de manifiesto lo importante de abordar los fenómenos asociados a la mecánica de medios continuos y desarrollar los esquemas cognitivos que están a la base de su organización.

Esto nos lleva a la conclusión que al caracterizar los procesos a través de estudios de caso tanto histórico de la física se convierte en una necesidad para estructurar la física en enseñanza y para orientar los procesos de conocimiento en los cursos de física.

Conclusiones:

- Al analizar el fenómeno ondulatorio el cual se propaga o trasmite una condición dinámica; donde la energía se puede transmitir de un lugar a otro por interacción

de cuerpos. El movimiento ondulatorio comparte propiedades que se dan en la naturaleza, como la reflexión, y refracción, estas son para todo tipo de onda, la difracción, polarización e interferencia, estas propiedades solo afectan las ondas transversales y la luz (ondas electromagnéticas). Estos fenómenos gobiernan las propiedades de las ondas.

- Al analizar el modelo mecánico da cuenta que fue de gran ayuda para Maxwell, ya que le permitió desarrollar la formulación matemática que identificó la luz como vibraciones del campo electromagnético; en particular que las ondas transversales de velocidad finita se mueven por el campo y las líneas de fuerza describen la vibración lateral de la que habla Faraday. Para esta época ya existía una teoría general de la elasticidad que fijaba la velocidad de las ondas transversales en un mecanismo sujeto a las leyes de Newton. Según esta teoría, el cuadrado de la velocidad de las ondas transversales es igual al coeficiente entre la rigidez y la densidad del medio $v^2 = \frac{r}{d}$, esto se reducía, por tanto, a la rigidez y densidad del mecanismo en términos de las propiedades electromagnéticas.
- Al estudiar el mecanismo de Maxwell logra conseguir la velocidad de las ondas transversales del mecanismo en términos de la capacidad inductiva y la permeabilidad magnética del medio. La densidad del medio estaba relacionada con la permitividad magnética y la rigidez con la capacidad inductiva; se sabía que la razón entre ambas era la velocidad de propagación de la onda.
- El concepto de éter (vacío) para Maxwell, está constituido de masa y es una sustancia elástica; actúa solo sobre las contiguas, por ende la velocidad de propagación debe ser finita. Sin embargo había razones por las cuales el éter poseía propiedades electromagnéticas ya que el campo electromagnético está formado de vacío.

- Se analizaron los experimentos de Hertz, los cuales demuestran que el circuito detector está sintonizado, para que entre en resonancia con el oscilador primario, siendo así mucho más sensible que un circuito ordinario. Cuando Hertz realizó el experimento, descubrió que las chispas (oscilaciones) del circuito detector tenían la misma intensidad que el primario. Y la velocidad se obtiene simplemente al relacionar la distancia entre dos nodos y la frecuencia de la onda. Es así como queda comprobada la existencia de la onda electromagnética.
- Al examinar el trabajo de Hertz, presenta la inducción de un oscilador sobre un resonador separados entre sí, sin embargo es donde se pueden ver las primeras ondas hercianas. Demuestra que existe una inducción de corriente, de un circuito a otro, donde la acción inductiva es de carácter electrodinámico, que es causado por las altas frecuencias que circulan por el alambre. Para conseguir una fuerte inducción, Hertz aumentó la capacidad del circuito de descarga y abrió los extremos del circuito lateral.
- Se introduce un documento meta-cognitivo el cual, conduce al lector al análisis y reflexión sobre los experimentos y dificultades que se encuentran en el desarrollo del concepto de la onda electromagnética y su medio de propagación; partiendo de la teoría de Maxwell y el libro original de ondas electromagnéticas de Hertz.

Glosario

ACCIÓN INDUCTIVA: Acción que ejerce una corriente variable sobre un conductor próximo en el cual puede inducir otra corriente.

(Castner, 1901)BOTELLA DE LEYDEN: el primer condensador eléctrico, descubierto por Leyden en 1745, que desempeñó un papel importante en la electricidad en el siglo XVIII. Donde las grandes armaduras metálicas están colocadas en el interior o exterior de una botella o vaso cilíndrico, cuyo vidrio hace de dieléctrico. Puede cargarse intensamente mediante una maquina electrostática, y puede descargarse violentamente acercando dos bolas conectadas a las armaduras hasta que salten chispas.

CAPACITANCIA: propiedad característica de un conductor, definida como el coeficiente de la carga eléctrica (pero de signo contrario) que se acumula en cada una de las armaduras, y la diferencia de potencial entre estas, donde por lo general se designa con la letra *C*.

CARRETE DE INDUCCIÓN: es un antiguo transformador eléctrico que, alimentado con una pila volta, genera una corriente alterna de alta frecuencia y elevado potencial. Sobre un núcleo de hierro dulce se ha embobinado un primario de hilo grueso por el que circula la corriente de la pila, convertida en corriente intermitente de alta frecuencia mediante un mecanismo apropiado. Sobre él se ha embobinado un secundario de hilo fino y muchas espiras en el que se inducirá una corriente alterna de la misma frecuencia y de elevado potencial.

CARRETE DE RUHMKORFF: es uno de los primeros carretes de inducción. Su modelo más sencillo consiste en un vasito con mercurio recubierto por un líquido aislante, realiza el contacto intermitente una aguja que cae hasta tocar el mercurio y es alzada por un sistema de palanca accionada por la atracción magnética. La descarga de este carrete se concibe como la excitadora de altas frecuencias.

CHISPERO: interrupción del conductor metálico de un circuito eléctrico para que la corriente salte allí por el aire en forma de chispa, Hertz distingue claramente los dos tipos de chispero el PRIMARIO insertado en el oscilador y formado por dos esferas desmontables para limpiar la oxidación de las fuerte chispas, y el CHISPERO SECUNDARIO insertado en el resonador y dado de un tornillo micrométrico para poder detectar debilísimas chispas.

DIELÉCTRICO: cuerpo que no conduce la electricidad, pero que bajo la acción inductiva es capaz de sufrir una polarización dieléctrica.

ELECTRO-DINÁMICA: teoría de los fenómenos eléctricos y magnéticos que los reduce todos a la acción a distancia entre cargas en reposo y cargas en movimiento o corrientes.

ESPIRALES DE RIESS: es un aparato para demostrar la inducción electromagnética, los circuitos primarios y secundarios consisten en una espira plana de alambre que se aloja en un canalito espiral escavado en un disco aislante. Ambos discos perfectamente simétricos se acoplan interponiendo entre ellos una delgada lámina aislante que separa los dos circuitos y puede cambiarse fácilmente.

INDUCTORIO: Hertz utiliza este término para referirse al carrete de inducción.

MICRÓMETRO DE CHISPAS: es término utilizado por Hertz para designar el chispero, utilizado en su circuito secundario, que permite estimar chispas muy cortas entre pequeñas bolas regulares.

PARA-CIRCUITO: es llamado así el circuito secundario en los primeros montaje que realizó Hertz, que comienza conectado al primario y considera después desconectado, pero a poca distancia de él. Lo llama también PARA CONDUCCIÓN.

PARA-CHISPA: son las chispas producidas en el correspondiente chispero secundario.

RESONANCIA: fenómeno mecánico con el que se logra hacer oscilar intensamente un sistema transmitiéndole impulsos repetidos con la frecuencia de una de sus oscilaciones propias. Hertz estudia el mismo fenómeno con oscilaciones propias del circuito de alta frecuencia, es por esto que al circuito secundario se lo denomina resonador.

Bibliografía

Alfonso, A. L. (2012). *Propuesta fenomenologica de las ondas electromagnéticas*. Bogotá: Universidad pedagógica nacional.

Ayala, M. M. (2006). *Los Análís históroco-critico y la recontextualizacion de los saberes científicos*. bogotá : Universidad Pedagogica Nacional.

- Belendez, A. (2008). *La unificación de la luz, electricidad y magnetismo: la síntesis electromagnética de Maxwell*. España.
- Berkson, W. (2008). *La teoría de campos de fuerzas desde Faraday hasta Einstein*. España: Versión española de Luisa Gonzalez Seco.
- Caicedo, J. G. (s.f.). Del contexto de la producción de conocimiento al contexto de la enseñanza: Análisis desde una perspectiva pedagógica. *Revista colombiana de educación*.
- Campo y ondas . (s.f.). *Ondas electromagnéticas*.
- Castillo, J. C. (2008). La historia de las ciencias y la formación de maestros: la re-contextualización de saberes. *Nodos y Nudos*.
- Castner, J. (1901). *trabajos científicos, la telegrafía eléctrica sin hilos conductores*. Recuperado el 17 de Agosto de 2014, de www.bibliotecavirtualdefensa.es/BVMDefensa/il8n/catalogo.../grupo.cmd?...
- Ducretet, A. (s.f.). *Metodos Hercianos, sus fundamentos*. Trabajo en español.
- Gambua, J. C. (s.f.). *Los experimentos de Hertz*. Recuperado el 6 de Mayo de 2014, de http://www.coit.es/foro/pub/ficheros/los_experimentos_de_hertz.d7a9911e.pdf
- Hecht, L. (2001). *la electrodinámica suprimida de Ampere-Gauss-Weber*. Recuperado el 5 de diciembre de 2014, de Science & Technology: <http://www.21stcenturysciencetech.com/articles/spring01/Electrodynamics.html>
- Hertz, H. (1990). *Ondas electromagnéticas*. Barcelona : Universidad politécnica de Cataluña.
- Maxwell, J. (1887). *trateD' electricite' et de magnetisme*. Francia: Jaques Gaboy.
- Moreira, M. A. (1988). Modelos mentales Y aprendizaje de física en electricidad y magnetismo. *Revista de enseñanza de las ciencias*.
- Ondas electromagnéticas y óptica*. (s.f.). Recuperado el 9 de diciembre de 2014, de [www.\(6\)DIFRACCION oem.pdf](http://www.(6)DIFRACCION oem.pdf)
- Permitividad*. (s.f.). Recuperado el 19 de enero de 2015, de <http://www.lupsm.files.wordpress.com>
- Poul, T. (1995). *Física para ingenieros*.

Rojas, Y. (s.f.). Dificultades en la modelación didáctica del modelo biológico de la flor. *Un estudio de caso de la licenciatura en educación básica, énfasis en ciencias naturales y educación ambiental*. Antioquia, Medellín.

Ruiz, F. J. (s.f.). *Modelo didactico para la enseñanza de las ciencias naturales*. Recuperado el 27 de enero de 2015, de <http://www.latinoamericana.ucaldas.edu.co>

Ruiz, M. M. (s.f.). *vibraciones y ondas*. Recuperado el 20 de septiembre de 2014, de *Movimiento ondulatorio y ondas mecanicas*: http://www.Webs.ono.com/...PDF/F2b_12_VO_MO.

Semanky, S. &. (1989). *Física, coleccion ciencia y tecnología*. Madrid: Aguilar.

Serway, R. (1997). *Física*. Mexico: McGrawHill.

A. ANEXOS

A.1. Las ondas electromagnéticas en el aire y su reflexión

En este apartado Hertz muestra los experimentos, por los cuales se convence de la existencia de las ondas hertzianas. Con ondas estacionarias de cerca de 10 metros resulta convincente. La acción inductiva que se propaga ondulatoriamente, se refleja sobre las paredes, y las ondas reflejadas reforzaban a los incidentes a una cierta distancia y a otra las debilitan, al formarse mediante la interferencia ondas estacionarias en el aire. Hertz sentía que había demostrado de una forma indirecta y algo complicada la velocidad finita de propagación en el aire, y anhelaba demostrarlo de una forma más directa y sencilla. Durante los experimentos anteriores había observado unos fenómenos que parecían apuntar a una reflexión de las ondas en las paredes.

A.2. Propagación de las ondas eléctricas por alambres

Se sabía desde hace tiempo que cuando fluye una corriente eléctrica continua por un hilo (alambre) esta corriente circula por toda la sección del alambre, pero si la corriente es variable la autoinducción hace que se modifique la distribución de la corriente y tiende a concentrarla hacia el exterior. Pero cuando la corriente cambia varios millones de veces por segundo se confina a una película muy fina. En estos casos extremos es difícil aplicar las teorías antiguas, sin embargo la teoría de Maxwell lo explica sin dificultad. Hertz se propuso investigar lo que ocurre en el interior de un alambre por el que circula una onda electromagnética, y medir la profundidad que alcanza la corriente. Para examinar lo que ocurre en el interior tendió 24 alambres en paralelo que formaban una especie de tubo. Examinó el espacio interior con un aro pequeño y probó que no podía observar ninguna acción eléctrica en su interior. Después preparó tubos metálicos de diferente espesor, hasta llegar a un tubo de papel dorado, y en todos los casos no detectó nada en su interior. Llegó a probar un tubo de vidrio con un depósito electroquímico de plata de diferentes espesores. Pudo determinar que sólo comenzaba a detectar algo cuando la capa de plata era prácticamente

transparente³⁴. Con este espesor tan mínimo debe pensarse más bien que las ondas se deslizan por el hilo, y circulan por el espacio inmediatamente próximo al alambre. Para demostrar esta suposición tendió dos alambres paralelos y en línea recta por donde envió las ondas. Sólo detectó la señal en el espacio entre los alambres y dedujo que la onda progresa por el espacio confinado entre los alambres.

A.3. Ondas eléctricas estacionarias

Los experimentos fueron realizados en el aula de física, la cual tiene 15 metros de largo aproximadamente, 14 de ancho y 6 de alto. Paralela a ambas paredes se extienden dos hileras de columnas de hierro, las cuales están bajo la acción electrodinámica como una pared sólida. Quedaba un espacio libre para los experimentos de 15 metros de largo, 8.5 de ancho y 6 de alto. De este espacio retiro todas las cosas que de alguna manera realizaran acción perturbadora. Una de las paredes de este espacio, sobre la que debía tener lugar de reflexión³⁵. Frente al centro de esta pared, a 13m de distancia, por tanto a 2m de distancia de la pared opuesta, se instaló el conductor primario³⁶. El alambre conductor se colocó verticalmente, es decir la fuerza oscilaba en dirección vertical, arriba y abajo.

El conductor secundario era el mismo circuito circular de 35cm de radio anteriormente utilizado. Podía girar sobre sí mismo, sujeto a un eje que pasaba por su centro y era perpendicular a su plano. Las chispas son suficientemente violentas para ser vistas en la oscuridad a una distancia de varios metros; por supuesto que, con la habitación iluminada; no puede percibirse prácticamente nada.

³⁴ un espesor inferior a una milésima de milímetro.

³⁵ Pared maciza de piedra arenisca, perforada por la abertura de dos puertas.

³⁶ Se utilizó el mismo conductor de los experimentos anteriores sobre la velocidad de propagación.

Al estar el excitador (primario) en actividad, se observa que a cierta distancia de él surgen las chispas en la interrupción del resonador (secundario), que después van suprimiendo hasta desaparecer; aparecen luego estas chispas y llegan a estallar de un modo continuo; vuelve a disminuir, a desaparecer, a surgir de nuevo, y así sucesivamente en todo el trayecto que se hace recorrer al resonador, desde la posición ocupada por el excitador hasta la placa metálica. El resonador, tiene en dicho trayecto alternativas de funcionamiento y de inactividad, al hallarse en un punto fijo y bien determinado.

El fenómeno de ondas estacionarias, es una prueba de la naturaleza ondulatoria del movimiento del éter en las acciones eléctricas a distancia, y se atribuye a la interferencia a las ondas eléctricas emitidas directamente por el excitador con las reflejadas por la placa, estas ondas pueden encontrar a las directas con una diferencia en su formación, o sea con una diferencia de fase, exactamente igual a una semi-longitud de onda, de tal modo sus efectos son unas veces en contrario y otras en igual sentido, es decir que se anulan o se suman, resultado alternativamente falta y aumento de energía eléctrica, en los puntos que se llaman nodos y vientres de las ondas.

A.4. Indicación de la onda magnética

Como en los montajes que se presentaron anteriormente, coloca el resonador en el plano de oscilación eléctrica, con el chispero vuelto hacia arriba, supone teóricamente que la fuerza magnética oscila en la dirección perpendicular y que la corriente inducida es proporcional a la variación del flujo de fuerza magnética a través, la intensidad de la chispa mide, el valor absoluto, el máximo de la fuerza magnética, Hertz expresa esta idea mediante la fluctuación de las líneas de fuerza.

Hertz sentía en su interior que todos los experimentos que había hecho se basaban en las mediciones de los efectos causados por la componente eléctrica de las ondas. En este papel expresa su esperanza de observar directamente la componente magnética de las ondas y establecer sin ningún género de dudas la

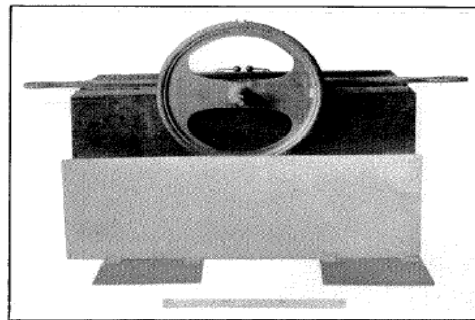
existencia de nodos, ondas estacionarias, etc. Para ello prepara unos aparatos para medir directamente la fuerza mecánica causada por las ondas con la esperanza de diferenciar si estas fuerzas mecánicas estén causadas por la componente eléctrica o magnética. Para detectar la componente eléctrica construyó un tubo cilíndrico de oro de paredes muy delgadas, suspendido de un hilo de seda, un imán lo mantenía en su posición. Cerca del tubo se encontraban dos hilos por los que pasaban las ondas. Todo este conjunto estaba encerrado dentro de una caja de vidrio. Situando este instrumento entre dos hilos rectos y paralelos pudo medir la intensidad de la onda estacionaria en ellos y dibujar en un papel una curva senoidal.

Para detectar la fuerza magnética sustituyó el cilindro de oro por un bucle de aluminio. Al repetir con él los mismos experimentos que había hecho con el tubo de pan de oro observó que el anillo seguía desviándose en los nodos, donde el tubo no se desviaba en absoluto. Con esto concluye que el anillo se ve sujeto a la acción de los efectos de dos fuerzas. Junto a la oscilación eléctrica se encuentra otra oscilación de otro tipo, pero sus puntos nodales no coinciden, y la dirección entre ellas es perpendicular.

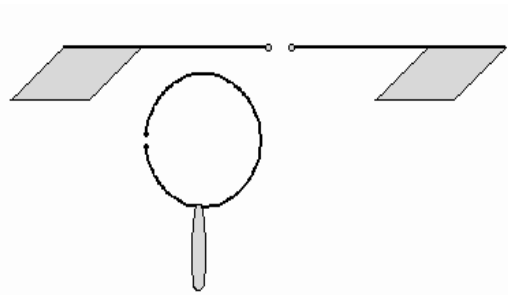
La orientación de la fuerza magnética es aquí posible mediante la teoría, mediante el experimento no se puede concluir otro tipo de fuerza, por tanto solo la fuerza eléctrica. Hertz ya no piensa como los electrodinámicos en acción electrostática y electrodinámica, sino como los maxwellianos³⁷.

A.5. Efectos electromagnéticos producidos por las perturbaciones eléctricas en los aisladores.

³⁷ En fuerza eléctrica y magnética, en partículas son campos electromagnéticos.

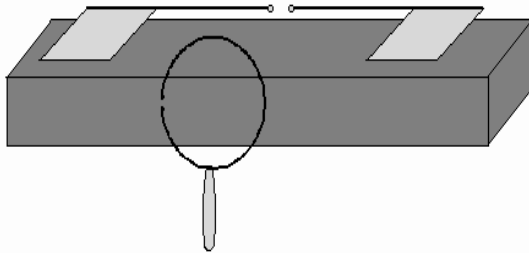


1(a)



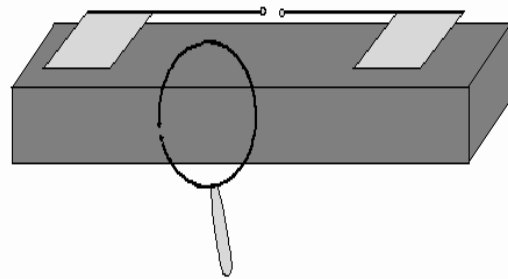
1(b)

El aro se encuentra en un punto nulo, en esta posición no se observa ninguna chispa.



1(c)

Al colocar un bloque aislante vuelven a aparecer chispas en el aro.



1(d)

Al girar unos grados el aro se obtiene de nuevo el punto nulo. El bloque aislante ha desplazado unos grados la posición del punto nulo.

Figura 1. (Gambua).

En este experimento se aprovecha de los puntos de equilibrio que ha encontrado Hertz. Prepara un aparato mediante el cual puede situar el aro en un punto fijo, hacerlo girar sobre su eje central hasta hacer desaparecer la chispa, e insertar un dieléctrico para medir su efecto. En la Fig. 1a se muestra una fotografía del aparato original de Hertz, en la Fig. 1b se muestra esquemáticamente el mismo. Primero se ha de girar el aro mientras funciona el aparato hasta que dejan de observarse chispas en el chispero micrométrico. Después se sitúa un bloque aislante entre las placas de los extremos del oscilador,

vuelven a aparecer las chispas en el aro. Luego, manteniendo el bloque dieléctrico, se gira otra vez el aro hasta hacer desaparecer las chispas y se mide el ángulo de diferencia entre la posición de nulo antes y después de introducir el bloque aislante. Repitió este experimento con diversas sustancias y con la mayor pureza posible para no dejar ninguna duda del efecto observado. En las Figs. 1c y 1d podemos ver en qué consiste el experimento. Con este trabajo ganó el premio ofrecido por la Academia de Berlín. Pero había llegado demasiado lejos para darlos por concluidos.

Hertz se percató de que la tasa de variación de las fuerzas eléctricas intervenía de manera importante, ya que esto lo llevo a reconsiderar las diferentes teorías de la electricidad, como la teoría de Maxwell; es decir que todas las perturbaciones electromagnéticas se propagaban a la velocidad de la luz, cuyo valor es aproximadamente trescientos millones de metros por segundo. Hertz inicio sus investigaciones con el único propósito de detectar a acción magnética en los dieléctricos. Ideo un método el cual consistía en cambiar la posición del circuito detector, como se indica en la figura 5; de forma que estuviera en diferentes planos, de tal manera que el espirómetro ocupa diferentes posiciones, con esta nueva técnica logro separar efectos eléctricos de magnéticos que tenían lugar en el circuito oscilante pudiendo comparar efectos magnéticos, con o sin dieléctrico. La presencia del dieléctrico aumentaba la chispa, tal y como hubiera hecho un conductor; la polarización variable constituye una corriente igual que la corriente de conducción.

A.6. Las fuerzas de las oscilaciones, tratadas según Maxwell

Se pretende explicar las ondas hertziana en torno a un dipolo de Hertz³⁸; por lo cual Hertz pretende explicar los experimentos anteriores a partir de la teoría de Maxwell, dejando de lado otras teorías, reinterpretando electrodinámicas, en especial su distinción entre fuerzas electrodinámicas y electrostáticas. Al explicar la concepción formación inicial de la onda, indica que esta no se debe solo a las cargas del oscilador, sino a las condiciones de todo en espacio y su alrededor. De esta concepción Maxwelliana pura, solo tiene sentido hablar de la distribución espacial y evolución temporal de la fuerza eléctrica y la fuerza magnética.

La fuerza magnética era el término que empleaba Hertz, para significar lo que hoy denominamos campo eléctrico. Su sede es cada punto del espacio, y propiamente solo cuando actuara como fuerza cuando se coloque en él un polo de prueba, Hertz expresa su carácter vectorial mediante las componentes cartesianas designadas por L, M Y N ³⁹. Hertz utiliza la fuerza magnética después de su conversión y lo visualiza mediante las líneas de fuerza magnética, a las que el vector de fuerza magnética es tangente en cada punto, y que evolucionan junto con las eléctricas, en forma de onda electromagnética. Hertz rara vez habla de campos magnético para designar el dominio especial por el que se propagan estas fuerzas y su energía.

³⁸ Dos cargas eléctricas opuestas que oscilan armónicamente con altas frecuencias a lo largo de un segmento, estando siempre situados respecto al centro.

³⁹ Nosotros las utilizamos H_x, H_y y H_z .