

LA CARTOGRAFÍA CONCEPTUAL:  
UNA ESTRATEGIA PARA LA ENSEÑANZA DEL CONCEPTO DE ONDA  
ELECTROMAGNÉTICA

JULIETH KHATERINEE MARTINEZ CASTIBLANCO

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL FACULTAD DE CIENCIA Y  
TECNOLOGÍA

DEPARTAMENTO DE FÍSICA BOGOTÁ D.C.

2021.

LA CARTOGRAFÍA CONCEPTUAL:  
UNA ESTRATEGIA PARA LA ENSEÑANZA DEL CONCEPTO DE ONDA  
ELECTROMAGNÉTICA

JULIETH KHATERINEE MARTINEZ CASTIBLANCO

TRABAJO DE GRADO PRESENTADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
LICENCIADO EN FÍSICA

ASESOR: JUAN CARLOS CASTILLO AYALA

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL  
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA DEPARTAMENTO DE FÍSICA  
LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: ENSEÑANZA DE LAS CIENCIAS DESDE UNA  
PERSPECTIVA CULTURAL  
BOGOTÁ D.C.

2021.



*Ilustración 1 Retrato de Hertz. (Imagen Propia)*

*"No creo que las ondas que he descubierto tengan ninguna aplicación práctica"*

*Heinrich Hertz*

## CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>CAPITULO 1</b> .....	<b>3</b>
<b>CONTEXTO PROBLEMÁTICO: LA ENSEÑANZA DE LA ONDA ELECTROMAGNÉTICA</b> .....	<b>3</b>
<b>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....	<b>3</b>
<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>5</b>
<b>OBJETIVO GENERAL</b> .....	<b>5</b>
<b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b> .....	<b>5</b>
<b>ANTECEDENTES</b> .....	<b>6</b>
<b>METODOLOGÍA</b> .....	<b>10</b>
<b>TIPO DE INVESTIGACIÓN</b> .....	<b>10</b>
<b>CAPITULO 2</b> .....	<b>14</b>
<b>CONTEXTO METODOLÓGICO: LA CARTOGRAFÍA COMO MÉTODO INVESTIGATIVO PARA LA ENSEÑANZA DE LA FÍSICA</b> .....	<b>14</b>
<b>¿QUÉ ES LA CARTOGRAFÍA?</b> .....	<b>14</b>
<b>TIPOS DE CARTOGRAFÍAS</b> .....	<b>16</b>
<b>LA CARTOGRAFÍA COMO ESTRATEGIA</b> .....	<b>17</b>
<b>CAPITULO 3</b> .....	<b>21</b>
<b>DESARROLLO DE LA CARTOGRAFÍA CONCEPTUAL DE LA ONDA ELECTROMAGNÉTICA</b> .....	<b>21</b>
<b>EJES DE INVESTIGACIÓN DESARROLLADOS</b> .....	<b>21</b>
<b>1. EJE DE LA CATEGORIZACIÓN</b> .....	<b>21</b>
<b>2. EJE DE VINCULACIÓN</b> .....	<b>23</b>
<b>3. EJE DE LA EJEMPLIFICACIÓN</b> .....	<b>43</b>
<b>CAPITULO 4</b> .....	<b>46</b>
<b>REFLEXIONES GENERALES</b> .....	<b>46</b>
<b>REFLEXIÓN FRENTE AL DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN</b> .....	<b>46</b>

MAPEO CARTOGRÁFICO DE LA ONDA ELECTROMAGNÉTICA .....	48
<b>CAPITULO 5 CONCLUSIONES</b> .....	<b>51</b>
CONCLUSIONES.....	51
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>52</b>
<b>ANEXOS ANEXO 1 (FOTOGRAFÍAS DE LA CARTOGRAFÍA EN FÍSICO).</b> .....	<b>58</b>
<b>ANEXO 2:</b> .....	<b>63</b>
DEMOSTRACION MATEMATICA DE LAS ONDAS ELECTROMAGENTICAS APARTIR DE LAS ECUACIONES DE MAXWEL .....	63
<b>ANEXO 3</b> .....	<b>67</b>
PROPUESTA PEDAGÓGICA ENTORNO A LA CARTOGRAFÍA CONCEPTUAL.....	67

#### ILUSTRACIONES

<i>ILUSTRACIÓN 1 RETRATO DE HERTZ. (IMAGEN PROPIA)</i> .....	3
<i>ILUSTRACIÓN 2 DIAGRAMA DE LAS CLASIFICACIONES QUE SE DAN DESDE LO GENERAL HASTA LO PARTICULAR. (IMAGEN PROPIA)</i> .....	7
<i>ILUSTRACIÓN 3 DIAGRAMA DE TORTUGA FRENTE A LOS ANTECEDENTES Y SUS RELACIONES ENTRE CATEGORÍAS ENTRE SÍ. (IMAGEN PROPIA)</i> .....	8
<i>ILUSTRACIÓN 4 DIAGRAMA DE RELACIONES CATEGORIALES. (IMAGEN PROPIA)</i> .....	9
<i>ILUSTRACIÓN 5 DIAGRAMA SINÓPTICO DE LOS TIPOS DE CARTOGRAFÍA. (IMAGEN PROPIA)</i> .....	16
<i>ILUSTRACIÓN 6 MAPA MENTAL DE LO QUE ES UNA CARTOGRAFÍA CONCEPTUAL. (IMAGEN PROPIA)</i> .....	18
<i>ILUSTRACIÓN 7 ESPIRAL DE RIESS. (IMAGEN PROPIA)</i> .....	25
<i>ILUSTRACIÓN 8 EXPERIMENTO, CON EL CUAL BUSCABA DESAPARECER LA CHISPA O POR LO MENOS DEBILITARLA. (IMAGEN PROPIA)</i> .....	26
<i>ILUSTRACIÓN 9 EXPERIMENTO, CON EL CUAL BUSCABA DETERMINAR LA CAPACIDAD DE LA CHISPA. (IMAGEN PROPIA)</i> .....	26
<i>ILUSTRACIÓN 10 MODIFICACIÓN DEL EXPERIMENTO, INMEDIATAMENTE ANTERIOR CON EL CUAL BUSCABA DESAPARECER LA CHISPA. (IMAGEN PROPIA)</i> .....	27

<i>ILUSTRACIÓN 11 EXPERIMENTO, EN EL CUAL BUSCABA SEPARAR EL CIRCUITO PRIMARIO DEL CIRCUITO SECUNDARIO, PARA ELLO AÑADIÓ EN LA MITAD DE LOS DOS, UN CIRCUITO AL CUAL LLAMO TERCER CIRCUITO. (IMAGEN PROPIA).....</i>	<i>29</i>
<i>ILUSTRACIÓN 12 EXPERIMENTO CON EL CUAL BUSCABA, ESTABLECER QUE ERA LO QUE PRODUCÍA LA CHISPA. (IMAGEN PROPIA) .....</i>	<i>30</i>
<i>ILUSTRACIÓN 13 EXPERIMENTO EL CUAL BUSCABA OBSERVAR LOS PUNTOS NODALES, ADEMÁS DE TRATAR DE AUMENTAR LA CHISPA. (IMAGEN PROPIA).....</i>	<i>32</i>
<i>ILUSTRACIÓN 14 EXPERIMENTO CON EL CUAL BUSCABA, OBSERVAR ALGUNOS EFECTOS EN LOS DIELECTRICOS. (IMAGEN PROPIA).....</i>	<i>35</i>
<i>ILUSTRACIÓN 15 MUESTRA EL COMPORTAMIENTO DE LAS CHISPAS, A PARTIR DE LA POSICIÓN DEL CIRCUITO SECUNDARIO CON RESPECTO AL PRIMARIO. (IMAGEN PROPIA). </i>	<i>35</i>
<i>ILUSTRACIÓN 16 CAMBIA LA FORMA DEL RESONADOR A CIRCULAR CON LO CUAL BUSCABA OBSERVAR SU COMPORTAMIENTO. (IMAGEN PROPIA). .....</i>	<i>36</i>
<i>ILUSTRACIÓN 17 AL EXPERIMENTO INMEDIATAMENTE ANTERIOR LE AÑADE UN DIELECTRICO CON EL FIN DE OBSERVAR SU COMPORTAMIENTO. (IMAGEN PROPIA).....</i>	<i>37</i>
<i>ILUSTRACIÓN 18 EXPERIMENTO QUE BUSCABA DETECTAR DICHA PROPAGACIÓN, PARA ELLO INTENTO CAMBIAR LA POSICIÓN DEL RESONADOR ENTRE L1, L2 Y POSICIÓN 1 INICIAL, LA CUAL APUNTABA A LAS PLACAS DE A Y P. (IMAGEN PROPIA).....</i>	<i>38</i>
<i>ILUSTRACIÓN 19 COMPORTAMIENTO SINUSOIDAL DE LA ONDA DEBIDO A LA POSICIÓN DEL RESONADOR CIRCULAR. (IMAGEN PROPIA).....</i>	<i>40</i>
<i>ILUSTRACIÓN 20 DIAGRAMA SINÓPTICO DE LA CARTOGRAFÍA CONCEPTUAL CONSTRUIDA, POR ASPECTO. (HISTÓRICO, TEÓRICO, CONCEPTUAL, MATEMÁTICO Y EXPERIMENTAL) (IMAGEN PROPIA).....</i>	<i>50</i>
<i>ILUSTRACIÓN 21 CARTOGRAFÍA EN FÍSICO, LA CUAL MUESTRA LA CAJA, LA CUAL EN SU INTERIOR CONTIENE CADA UNO DE LOS ASPECTOS DE ESTA TEORÍA, ASPECTOS DESARROLLADOS DENTRO DE ELLA .....</i>	<i>58</i>
<i>ILUSTRACIÓN 22 PRIMER ASPECTO, HISTÓRICO .....</i>	<i>59</i>
<i>ILUSTRACIÓN 23 SEGUNDO ASPECTO, TEÓRICO IMAGEN PROPIA.....</i>	<i>60</i>
<i>ILUSTRACIÓN 24 TERCER ASPECTO EL CONCEPTUAL, Y CUARTO ASPECTO MATEMÁTICO IMAGEN PROPIA .....</i>	<i>61</i>
<i>ILUSTRACIÓN 25 QUINTO ASPECTO, EL EXPERIMENTAL. (LA LUZ ES EL BOMBILLO ENCENDIDO, LUEGO DE UNA DESCARGA DE UN ENCENDEDOR DE COCINA). .....</i>	<i>62</i>

TABLA 1 MUESTRA DE LOS OCHO EJES, PROPUESTOS POR SERGIO TOBÓN(IMAGEN PROPIA).....	12
TABLA 2 EJES PROPUESTO PARA EL DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN (IMAGEN PROPIA).....	12
TABLA 3 MUESTRA LOS EJES PROPUESTOS PARA ESTA INVESTIGACIÓN (IMAGEN PROPIA).....	19

**NOTA:** *Cada una de las imágenes y diagramas que se encuentran en el presente trabajo son propias, ninguna es tomada de ninguna fuente.*

## INTRODUCCIÓN

El presente trabajo aborda el problema de la enseñanza de las ondas electromagnéticas, el cual es desarrollado a partir de la metodología de la cartografía conceptual, con el fin de construir aspectos y criterios para su enseñanza.

Para la construcción del texto fue importante la consulta de diferentes fuentes las cuales eran seleccionadas bajo algunos criterios establecidos desde el inicio de la investigación, esto con el fin de acotar y dar un horizonte; dentro de los criterios que se tuvieron en cuenta: Que sean fuentes académicas o investigativas, como artículos, libros o capítulos de libros, partiendo de la obra de Heinrich Hertz de las ondas electromagnéticas, esto con el fin de que la información sea fiable, además de que nos ayude a la construcción conceptual y a la recontextualización de la misma, también que sean fuentes que permita abordar elementos para la enseñanza-aprendizaje, para la construcción de criterios de enseñanza de las ondas electromagnéticas.

Para la organización de dicha información, se hizo uso de la cartografía conceptual, la cual tiene como ejes, categorización, vinculación y ejemplificación, el eje de categorización, busca situar las ondas electromagnéticas dentro de la teoría electromagnética de campos; el eje de vinculación busca mostrar la transición desde la teoría electromagnética de campo a las ondas electromagnéticas; y el eje de ejemplificación busca, dar a conocer sus usos y aplicaciones, de los cuales se hablara en detalle más adelante en el trabajo; además se realiza una recontextualización del trabajo de Heinrich Hertz, acerca de las ondas electromagnéticas, presentado en el texto, Las ondas electromagnéticas de Heinrich Hertz, la original y la versión Manuel García Doncel y Xavier Roque, esto con el fin de poder evidenciar las diferentes problemáticas, discusiones, fenomenologías y contextos teóricos que estuvieron a la base del planteamiento de la existencia de las ondas electromagnéticas por parte de Heinrich Hertz.

Este trabajo se presenta en cuatro capítulos. El primer capítulo titulado contexto problemático; la enseñanza de la onda electromagnética, hace referencia a la ubicación del trabajo, en relación con lo que se ha venido trabajando acerca de la onda electromagnética, aspecto que pone de presente algunas problemáticas en su enseñanza. Por otra parte, se presenta la pregunta que orienta el trabajo y los objetivos del mismo, además de hacer una revisión de antecedentes con el fin de fortalecer algunos de los aspectos trabajados desde la perspectiva cartográfica.

El segundo capítulo titulado contexto metodológico: La cartografía como métodos investigativos para la enseñanza de la física; el cual presenta la cartografía como metodología, además de dar a conocer por qué es importante tratar este tipo de temas con esta metodología, se referencian algunos trabajos que se han realizado, en otros contextos, haciendo uso de esta metodología, y el aporte que hacen éstos al presente trabajo.

El tercer capítulo, titulado: El desarrollo de la cartografía conceptual de la onda electromagnética, que se puede considerar como el capítulo central del trabajo, se desarrolla un análisis acerca del concepto de onda electromagnética mediante la cartografía conceptual, desarrollada en tres ejes, Categorización, vinculación y ejemplificación, planteados en la misma investigación, los cuales son tratados y desarrollados, con el fin de poder hacer una lectura de los aspectos y criterios para la enseñanza de la onda electromagnética.

El cuarto capítulo, titulado: Reflexiones generales, muestra los aspectos que se lograron identificar, con relación al concepto de onda electromagnética y su enseñanza, luego de realizar la cartografía conceptual; además se da a conocer la construcción y desarrollo del mapeo cartográfico de la onda electromagnética que se realiza a partir del análisis y construcción de aspectos para la enseñanza de las ondas electromagnéticas. Por último, encontraremos las conclusiones, las cuales nos permiten visualizar el alcance del trabajo propuesto y realizado. Además, se encontrarán algunos anexos con respecto a la cartografía.

# CAPITULO 1

## CONTEXTO PROBLEMÁTICO: LA ENSEÑANZA DE LA ONDA ELECTROMAGNÉTICA

### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El electromagnetismo es una teoría que requiere de un nivel muy alto de formalización, desde lo matemático incluso en lo conceptual, además de implicar un soporte experimental muy elaborado, tanto desde la concepción teórica de los fenómenos, como de la fenomenotécnica, ya que los fenómenos electromagnéticos en general no se presentan espontáneamente, es decir que la producción de este tipo de fenómenos implica diseños experimentales.

*“... la experiencia sensible que se tiene acerca de éstos es muy escasa, se reduce casi totalmente a corrientes y chispas, y tal experiencia no permite hacer una organización de los fenómenos eléctricos y magnéticos.” (Castillo Ayala J. , 2004).*

El caso de las ondas electromagnéticas es especialmente ilustrativo, ya que si bien hay fenómenos, que son explicados a través del concepto de onda electromagnética, como la luz y la radiación térmica entre otros, el planteamiento de dicho concepto, por parte de Hertz, implicó el diseño y construcción de una serie de dispositivos experimentales para producir los fenómenos, los cuales fueron interpretados y explicados desde la teoría electromagnética de campos, conduciendo así al planteamiento de la onda electromagnética. Paradójicamente en la enseñanza del electromagnetismo cuando se aborda el tema de las ondas electromagnéticas se hace muy poca alusión a los fenómenos que dieron origen a dicho concepto, además de dejarse de lado que éste es un concepto propio y una consecuencia de la teoría electromagnética de campos.

En la enseñanza del electromagnetismo, particularmente en el tema de las ondas electromagnéticas, se suele dar mayor énfasis a la formalización matemática, y en algunos pocos casos se presentan experimentos, mediante dispositivos muy refinados, que en muchos casos se constituyen en cajas negras que ocultan los

fenómenos; además se deja de lado la reflexión sobre los conceptos e imágenes teóricas acerca de los fenómenos electromagnéticos que están vinculados con el concepto de onda electromagnética y, que estuvieron presentes en la constitución del electromagnetismo como una teoría física.

El concepto de onda electromagnética cobra especial importancia en la física, puesto que permite la consolidación del enfoque dinámico de la teoría electromagnética de campos, Ayala M, (Citado por Castillo J 2004), puesto que se constituye en la descripción de la propagación de la acción electromagnética; no obstante en la enseñanza se suele presentar como una consecuencia matemática de las ecuaciones de Maxwell, así como se refería Erickson Ortiz en su trabajo: *“No obstante en la mayoría de los casos las ondas electromagnéticas son abordadas únicamente desde las ecuaciones de Maxwell a partir de las cuales se deducen haciendo uso de algunas relaciones matemáticas”* (Ortiz, 2017), Así pues, se le da prioridad a las ecuaciones de Maxwell y se deja de lado los aspectos conceptuales, las problemáticas y los fenómenos que dieron origen al concepto de onda electromagnética, esta situación implica que a pesar de que en la enseñanza se aborde la onda electromagnética, sea muy poco lo que se conoce de los aspectos conceptuales y experimentales de las mismas. En este orden de ideas, es necesario plantear alternativas que permitan abordar la enseñanza de las ondas electromagnéticas, de tal manera que se tenga en cuenta los aspectos conceptuales y fenomenológicos de estas ondas.

A pesar de que hoy día hay una gran cantidad de tecnología que está basada en las ondas electromagnéticas, existe desconocimiento de éstas, ya que es poco lo que se enseña de las ondas electromagnéticas en el aula, además de estar centrada su enseñanza, como se mencionó anteriormente, en las ecuaciones sin hacer referencia a experimento alguno.

En este orden de ideas, una alternativa para la enseñanza de las ondas electromagnéticas, que ponga de presente las problemáticas, las discusiones y los fenómenos acerca de éstas, implica una recontextualización de los trabajos de Hertz, en relación con las ondas electromagnéticas, para la enseñanza de las mismas. La recontextualización es una estrategia sistemática de conocimiento,

donde se da un trabajo de interpretación de esos conceptos y teorías científicas en relación con algún problema de enseñanza, entendida como: *“Una actividad constructiva y dialógica en busca de elementos para la elaboración y solución de un problema o la construcción de una imagen de una clase de fenómeno”* (Ayala Manrique, 2006). Para así poner en contexto al estudiante con el fin que le sea posible entender este concepto, además de los fenómenos que dan origen al mismo, es decir que pondríamos en discusión *“...las argumentaciones, las estructuras conceptuales y teorías elaboradas por los científicos, con las elaboraciones de quienes estén involucrados en los procesos de construcción de conocimiento”* (Castillo Ayala J. C., 2008). Todo esto para lograr construir nociones frente al concepto de Onda electromagnética, a partir del análisis de la obra de Heinrich Hertz y otros textos que hablan del desarrollo de esta teoría. Es así como nace la idea de hacer un trabajo cartográfico conceptual de las ondas electromagnéticas, con el fin de hacer una recontextualización, basada en el texto de Heinrich Hertz, para la enseñanza del electromagnetismo, que tenga presente elementos, históricos, matemáticos, conceptuales y fenomenológicos. Para ello es importante responder el siguiente interrogante:

**¿Qué elementos teóricos y fenomenológicos permiten abordar la enseñanza del concepto de onda electromagnética desde una perspectiva cartográfica conceptual para la recontextualización en cursos de electromagnetismo?**

## OBJETIVOS

### OBJETIVO GENERAL

Determinar los elementos teóricos y fenomenológicos necesarios para la enseñanza del concepto de onda electromagnética, desde una perspectiva cartográfica conceptual para su enseñanza en cursos de electromagnetismo.

### OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Realizar un análisis documental de diferentes fuentes, acerca de las ondas electromagnéticas, con el fin de consolidar referentes teóricos y fenomenológicos acerca de éstas.

2. Desarrollar un análisis de la obra de Heinrich Hertz, de las ondas electromagnéticas, con el fin de determinar aspectos teóricos y fenomenológicos que se encuentran a la base del concepto de onda electromagnética.
3. Construir un mapeo cartográfico del concepto de la onda electromagnética, a partir del análisis de los textos y aportes en relación con el concepto, con el fin de determinar criterios, elementos y orientaciones para la enseñanza de las ondas electromagnéticas en cursos de electromagnetismo.

## ANTECEDENTES

A lo largo de la investigación, se consultaron diferentes fuentes, con el propósito de ubicar y orientar el trabajo. Para ello fue necesario realizar una consulta de textos y trabajos sobre ondas electromagnéticas, hacer una clasificación de los mismos, con el fin de tener un panorama del tema, además de establecer referentes para el presente trabajo.

Dada la naturaleza del trabajo, es importante determinar unas categorías de organización, establecidas a partir de los requerimientos del mismo; esto debido a que es importante resaltar aspectos que nos pueden aportar estos trabajos a la investigación, ya que, aunque todos estén desarrollando el mismo tema cada uno lo a bordo de forma diferente, es ahí donde existe una verdadera relación a la hora de construir una investigación de corte cartográfico como lo es esta. Para ello se establecieron cuatro categorías las cuales son:

- Pedagógico: Estarán los trabajos que desarrollen una propuesta pedagógica, del tema a investigar.
- Experimental: Estarán los trabajos que desarrollen experimentalmente el experimento o los experimentos de Heinrich Hertz.
- Conceptual: Estarán los trabajos que desarrollen el concepto de onda electromagnética a partir de una investigación.

- **Histórico:** Estarán los trabajos que desarrollen una investigación de corte histórica frente a las ondas electromagnéticas. La siguiente ilustración muestra la organización de ver los desde una clasificación general a una más específica respondiendo a las necesidades del mismo trabajo. De esta manera se clasificaron los diferentes trabajos consultados como se muestra en la ilustración 3, donde se presentan las cuatro categorías, distinguidas por diferentes colores, y presentando así los trabajos consultados junto con sus autores y un breve resumen de lo realizado en cada uno de ellos.

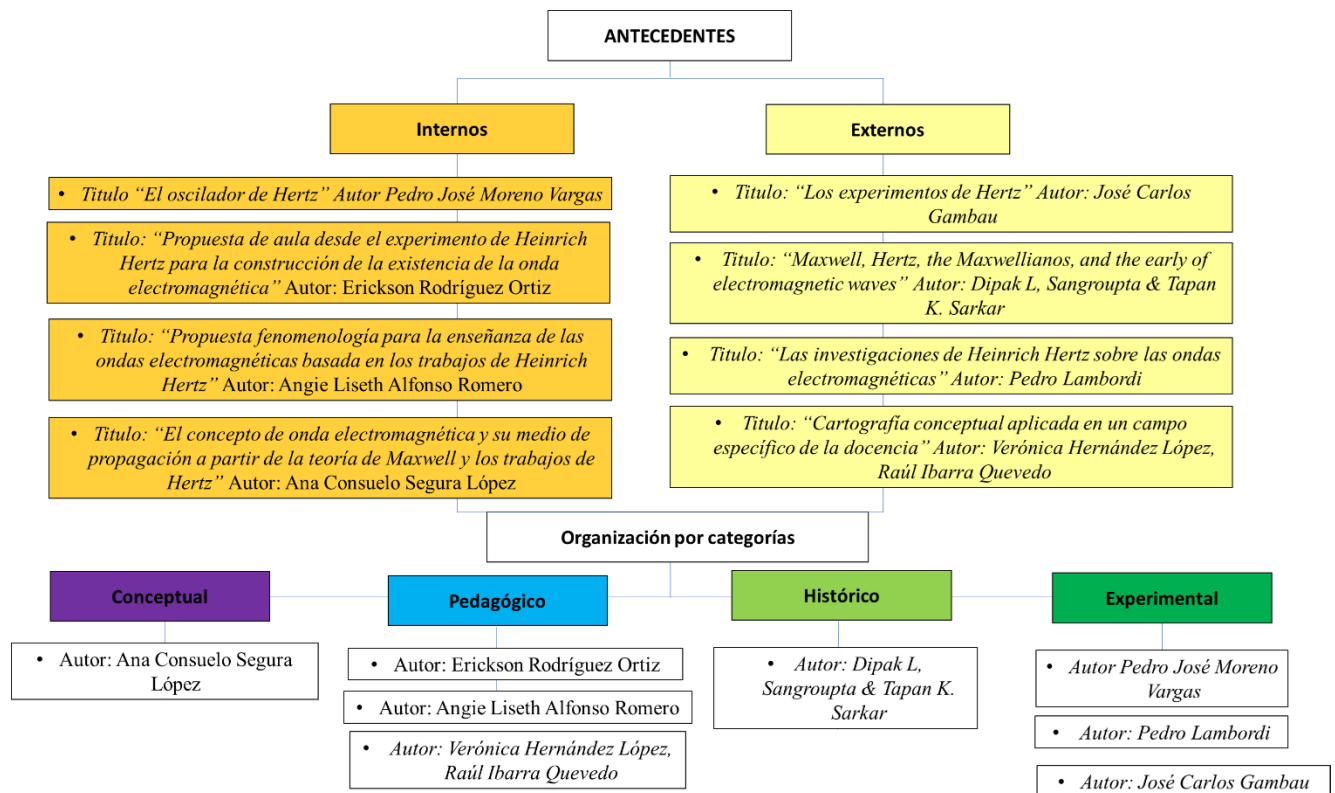


Ilustración 2 Diagrama de las clasificaciones que se dan desde lo general hasta lo particular. (Imagen Propia)

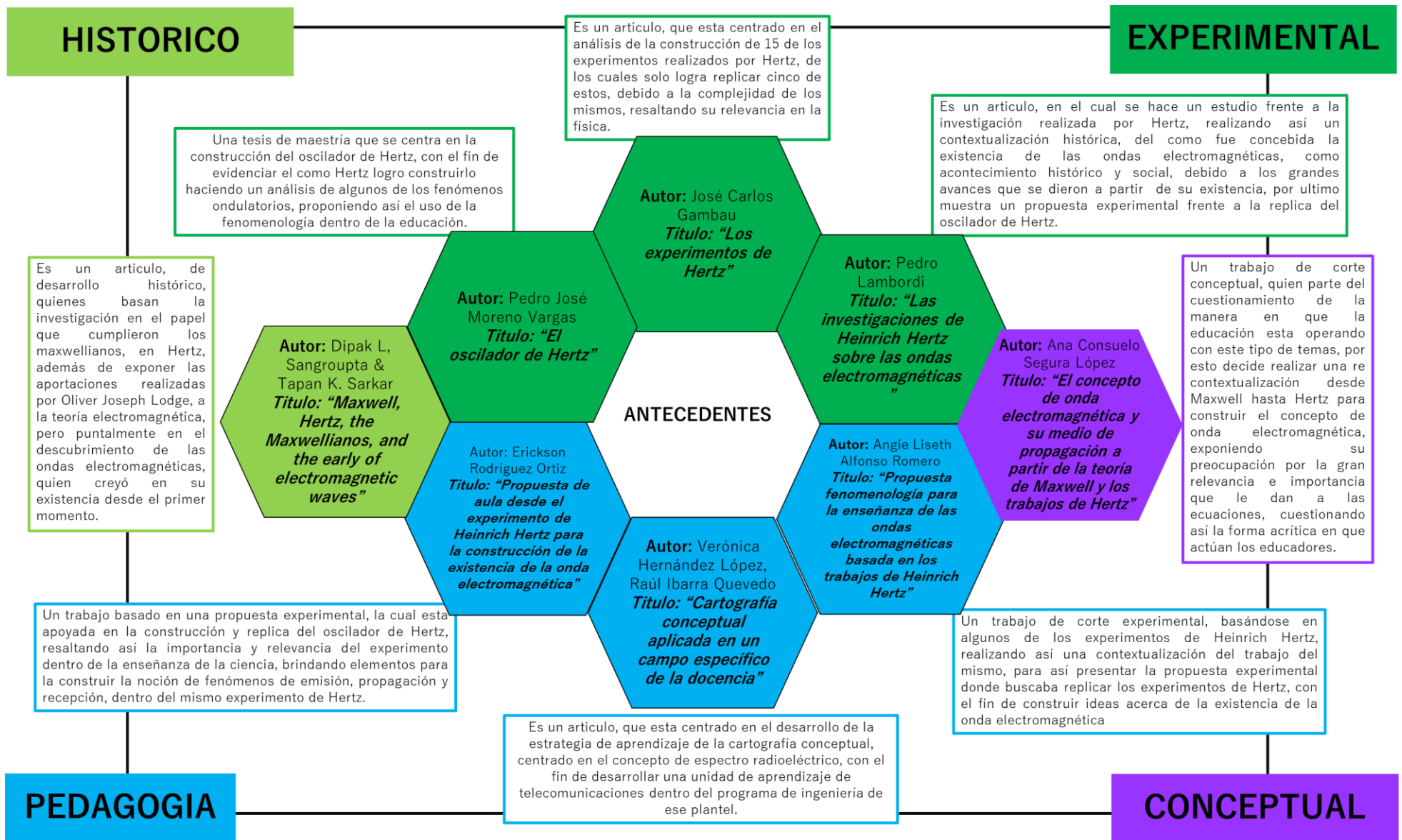


Ilustración 3 Diagrama de tortuga frente a los antecedentes y sus relaciones entre categorías entre sí. (Imagen Propia)

En la ilustración 4 podemos observar las relaciones que se pudieron establecer en cada uno de ellos, las cuales están distinguidas por flechas de cada color, ya que, aunque la investigación, este en marcada en una sola de esas categorías, no deja de tener presente otros aspectos y es ahí donde se buscan las relaciones entre las categorías, pueden ser una por separada, pero es el conjunto de la suma de las diferentes partes que la componen.

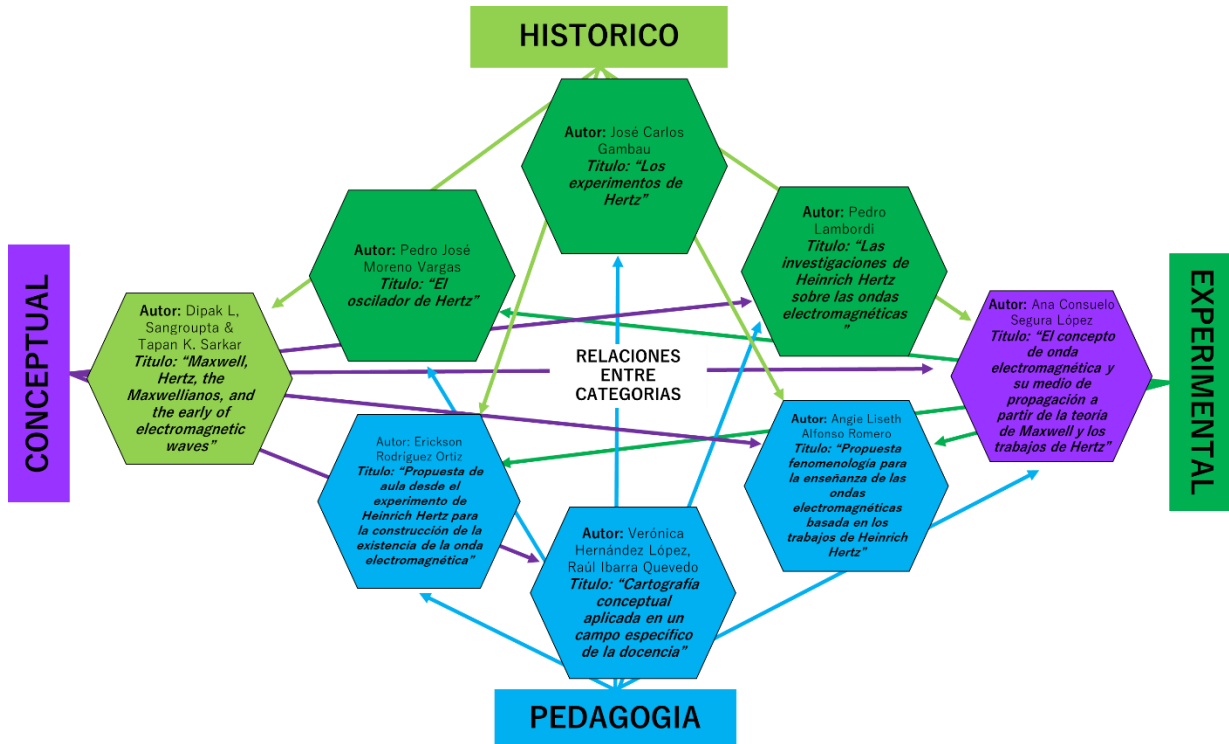


Ilustración 4 Diagrama de relaciones categoriales. (Imagen Propia)

A partir de las diferentes investigaciones que se han desarrollado, tanto interno como externo, frente a este tema, aportan diferentes elementos, ya que cada una de ellas abordó las ondas electromagnéticas desde diferentes perspectivas, poniendo de presente las distintas categorías en las que pueden ser abordadas, planteando, el cómo podría enseñarse este concepto. Si bien cada una de las investigaciones hace aportes importantes en relación con la comprensión del concepto de onda electromagnética y su enseñanza, se puede evidenciar que cada una de ellas se centra, casi exclusivamente, en un aspecto, ya sea, lo matemático, teórico, fenomenotécnico, histórico, y en general no se hace una mirada integral al concepto de onda electromagnética. Por otro lado en relación con la

cartografía conceptual, se encuentra un antecedente que aporta el ¿Cómo se puede aplicar esta estrategia dentro del ámbito escolar?, basándose en temas educativos, además de intentar mostrar el impacto que esta tiene al ser usada en el aula de clases, para generar elementos para la construcción de la cartografía conceptual de las ondas electromagnéticas, bajo la articulación de diferentes aspectos, ya sean teóricos, pedagógicos, históricos y demás de las ondas electromagnéticas con el fin de construir así criterios para su enseñanza.

## METODOLOGÍA

### TIPO DE INVESTIGACIÓN

La metodología del presente trabajo, se desarrollará orientada desde la cartografía conceptual, la cual implica la construcción de un mapeo que posibilite la organización del conocimiento construido a propósito del análisis de los textos que abordan la problemática de la onda electromagnética, además de constituirse en un instrumento metacognitivo, que pone de presente la comprensión que se tiene sobre este concepto, también es un instrumento útil desde el punto de vista didáctico, ya que permite presentar la información de una manera versátil para la enseñanza, el mapeo se entiende como: <sup>1</sup>“... *El proceso de mapear el pensamiento, visualizar el mapa, reflexionar sobre la representación generando un nuevo pensamiento es recursivo ya que el mapa configura el pensamiento y el pensamiento configura el mapa.*” (Pereira Okada, 2006). Es importante poner de presente que la cartografía sirve como instrumento para la organización y representación de las diferentes comprensiones acerca de la temática, la cual se logra mediante análisis de textos y en este caso particular análisis tendientes a la recontextualización de saberes para la enseñanza del concepto de onda electromagnética. Por otro lado, la cartografía se centra en un concepto, ya que, rastrear el curso de los conceptos y las teorías con todos sus altibajos, reconociendo sus discontinuidades y contradicciones,

---

<sup>1</sup> “... *proceso de mapear o pensamento, visualizar o mapa, refletir sobre a representação gerando um novo pensamento é recursivo à medida que o mapa vai configurando o pensamento eo pensamento configura o mapa.*” Traducido del portugués al español por el autor del trabajo.

conduce al docente a las esferas en donde debe asumir la tarea de una especie de geólogo del pensamiento científico, en donde debe reconocer la pedagogía, como una pedagogía de la razón, con el de: “...traer esos trabajos científicos y situarlos en el contexto escolar, para ello es importante poner en dialogo los saberes y por ello todo esto se construirá desde la perspectiva del análisis histórico-conceptual”, (Orozco, 2017), con el fin de construir criterios para la enseñanza de las ondas electromagnéticas, a partir de un análisis histórico, conceptual y crítico de estas.

El desarrollo de esta metodología, estará orientada en tres momentos importantes, los cuales permitirán avanzar, pero sobre todo establecer relaciones y criterios dentro de la misma investigación, ya que algunos nos proporcionaran herramientas para recolectar, pero sobre todo para organizar información, mientras las otras nos generan herramientas de análisis, y en conjunto se realizará la construcción cartográfica del concepto de onda electromagnética. Para organizar esa información haremos uso de las cartografías, particularmente de la cartografía conceptual, la cual permitiría organizar y clasificar la información, para así construir el mapeo del concepto de onda electromagnética, usaremos la cartografía como el método, pero sobre todo como el instrumento para organizar esa información. Esta categoría cartográfica, busca sistematizar, construir y comunicar conceptos y teorías que tengan relevancia, la cual estará dada con base en la propuesta realizada por Sergio Tobón, quien propone la cartografía conceptual, con el fin de reconstruir conceptos, en este caso se hará el uso de ella para construir el concepto de onda electromagnética. Este tipo de mapas investigativos, tiene como principal objetivo, <sup>2</sup>“... investigar y al mismo tiempo permite abrir caminos, descubrir atajos, establecer conexiones teóricas y prácticas, desde múltiples perspectivas”. (Pereira Okada , 2006). Permitiendo así una coherencia entre el contexto, el enfoque, la perspectiva y el análisis de la investigación, para ello la investigación estará enmarcada bajo tres ejes

---

<sup>2</sup> “...pesquisa e permite ao mesmo tempo abrir caminhos, descobrir atalhos, estabelecer conexões teóricas e práticas, sob múltiplas perspectivas.”. Traducido del portugués al español por el autor del trabajo.

(Tabla 1), en los ejes propuestos por Sergio Tobón (Tabla 2), esto con el fin de darle horizonte como investigación, con el fin de responder a la misma.

EJES PROPUESTOS PARA LA INVESTIGACIÓN
CATEGORIZACIÓN
VINCULACIÓN
EJEMPLIFICACIÓN

Tabla 2. Ejes propuestos para el desarrollo de la investigación. (Imagen Propia)

EJES PROPUESTOS POR SERGIO TOBÓN
NOCIÓN
CATEGORIZACIÓN
CARACTERIZACIÓN
DIFERENCIACIÓN
DIVISIÓN
VINCULACIÓN
METODOLOGÍA
EJEMPLIFICACIÓN

Tabla 2 Muestra de los ocho ejes, propuestos por Sergio Tobón (Imagen Propia)

La construcción mapeo metacognitiva se hará a través de una recontextualización de saberes, el cual es un estudio de corte histórico-crítico es una alternativa más para: investigar, analizar, reflexionar e informar frente a la enseñanza y aprendizaje de algún tema en particular, será una de las alternativas que nos ayudará a desarrollar la cartografía, ya que este tipo de metodologías nos permite tener de presente diferentes aspectos. Estos estudios nacen como respuesta a la gran problemática de la enseñanza de las ciencias, pero también como recurso y alternativa para la enseñanza, ya que busca la construcción de conocimiento y de historicidad en la ciencia.

Este tipo de estudios permiten evidenciar ciertos aspectos históricos, como: situaciones dadas en el propio contexto, que permeo de cierta forma el pensamiento y el desarrollo de teorías como estas en la época, además de consideraciones experimentales como adecuaciones para llevar acabo la visualización de estas ondas entre otros aspectos, que en su mayoría no son considerados a la hora de enseñar algún tema en particular en las ciencias, como detalles de la investigación, incluso efectos vistos durante la investigación, pero que no dieron gran relevancia, además que detrás de dichas ecuaciones o productos como lo nombra su autor esconde más que una serie de algoritmos los cuales: *“Permite situar las problemáticas que dieron origen a los productos de la ciencias, las lógicas y espacios de significación presentes en la constitución*

*de tales productos; aspectos que dan una comprensión mayor de las disciplinas científicas y proveen elementos para el maestro configuren rutas de trabajo y aborden la enseñanza de las ciencias”* (Castillo,2008), Para construir así nuevas formas, estrategias o rutas para la enseñanza de las mismas, partiendo de una recontextualización entre saberes del pasado y del presente, aporte a una construcción colectiva e individual de dicho conocimiento y a la construcción de la cartografía del concepto de onda electromagnética.

Teniendo claridad de lo que se busca en el trabajo es importante hacer algunas apreciaciones, sobre las implicaciones y razones por las que se realiza una cartografía de este tipo en función de un tema físico como las ondas electromagnéticas, las cuales serán presentadas y desarrolladas en el siguiente capítulo.

## CAPITULO 2

# CONTEXTO METODOLÓGICO: LA CARTOGRAFÍA COMO MÉTODO INVESTIGATIVO PARA LA ENSEÑANZA DE LA FÍSICA

Como se dijo anteriormente la cartografía sirve como instrumento para la organización y representación de las diferentes comprensiones acerca de la onda electromagnética, ésta se logra mediante el análisis de textos desde la perspectiva de recontextualización de saberes, la cual es centrada, al igual que la cartografía, en el concepto de onda electromagnética, es una forma de llevar el análisis a la construcción de conocimiento pero sobre todo a la propia interpretación y construcción del concepto de onda electromagnética.

### ¿QUÉ ES LA CARTOGRAFÍA?

Se considera que la cartografía es uno de los sistemas más antiguos de comunicación, pues éste surge mucho antes que el sistema numérico, ya que el Homosapiens a través del mapeo desarrollo cuatro habilidades importantes:

1. Proponer respuestas intuitivas de su entorno
2. Almacenar información
3. Abstractar información de su entorno
4. Compartir información procesada

De lo cual quedan algunos lienzos, incluso arte rupestre de esa época, permitiendo así conocer un poco de la historia de la época. Aunque la palabra cartografía viene del latín, Charta-grafía, las cuales traducen “*arte de trazar mapas*”, es una actividad que lleva siglos dentro de los seres humanos. Este término es propio de las ciencias sociales, específicamente de la geografía, sin embargo, este concepto de cartografía como método para la investigación, fue propuesto por Guattari y Deleuze en 1980 en su libro *Mil mesetas capitalismo y esquizofrenia* en el capítulo del Rizoma, la cartografía es una de las características de un rizoma, el cual es descrito como un tallo subterráneo que se extiende horizontalmente, emitiendo raíces de bajo de la tierra y encima de la misma emite yerbas y flores; ellos hacen la analogía del rizoma y el

conocimiento. Este al igual que el rizoma no es lineal, no tiene principio ni fin, pero sobre todo puede ser modificado. Por esto en una de sus características está el mapeo y la cartografía, la cual los relaciona como:

*“El rizoma está relacionado con un mapa que debe ser producido, construido, siempre desmontable, conectable, alterable, modificable, con múltiples entradas y salidas, con sus líneas de fuga.”* Guattari & Deleuze (1980), entendiendo esas líneas de fugas como otras interconexiones con otros saberes. Por ejemplo, cuando hablamos de la onda electromagnética, es necesario acudir a conceptos y especificaciones propias de la teoría electromagnética, buscando así relaciones que permitan la ilustración de la existencia, además de que permite entender la existencia de las ondas electromagnéticas desde la perspectiva de campos, ya que estas ondas no eran posibles teóricamente en otras teorías electrodinámicas de la época.

Desde ese momento hasta hoy el término, ha venido cambiando, ya que puede ser descrito como una técnica metodológica, que produce y promueve la construcción de conocimiento, a través del mapeo, y el dialogo de saberes. Este cambio de significado fue propuesto por John Brian Harley (Diaz Angel , 2009), quien propone una cartografía con el fin de tener una lectura interdisciplinar de los mapas, que implica una relación con unos supuestos ideológicos, culturales, científicos, teóricos, entre otros.

*“...relacionado con un mundo social invisible y con la ideología como con los fenómenos vistos y medidos en el paisaje [...]. Tanto en la selectividad de sus contenidos, como en sus signos y estilos de representación, los mapas son una manera de concebir, articular y estructurar el mundo humano, que se inclina hacia, es promovido por, y ejerce una influencia sobre grupos particulares de relaciones sociales.”.* (Diaz Angel , 2009).

Donde el acto de mapear trasciende de hacer dibujos, sino que se hace toda una construcción conceptual, y siempre está presente el dialogo de conocimientos y saberes, es así como la cartografía ha llegado a otras disciplinas distintas a la geografía y las ciencias sociales, donde un mapa tomo un gran valor dentro de las investigaciones y el aprendizaje. La Onda electromagnética, esta

implícitamente dentro de la teoría electromagnética, buscando relaciones con el fin de generar conocimiento entorno a la ciencias particularmente a la onda electromagnética ya que mapear estos conceptos implica, ubicarlo en un contexto teórico estableciendo, las múltiples relaciones con otros conceptos dentro de ese contexto teórico, las maneras como es formalizado y representado, aspectos metodológicos que dicho concepto encierra es decir permite ver el concepto de onda electromagnética desde su totalidad y complejidad.

## TIPOS DE CARTOGRAFÍAS

La cartografía es una disciplina, que tiene un campo de acción amplio, la cual se ocupa de la construcción, explicación y difusión de mapas, los cuales pueden ser geográficos o incluso investigativos de alguna temática en específico, existen diferentes tipos de cartografías, las cuales dependen de las intenciones, las especificidades, la disciplina en la cual se desarrolla, entre otras aspectos propios de la misma investigación; en el siguiente diagrama de árbol de dependencia, encontraremos algunas de las cartografías que actualmente se desarrollan en diferentes disciplinas.

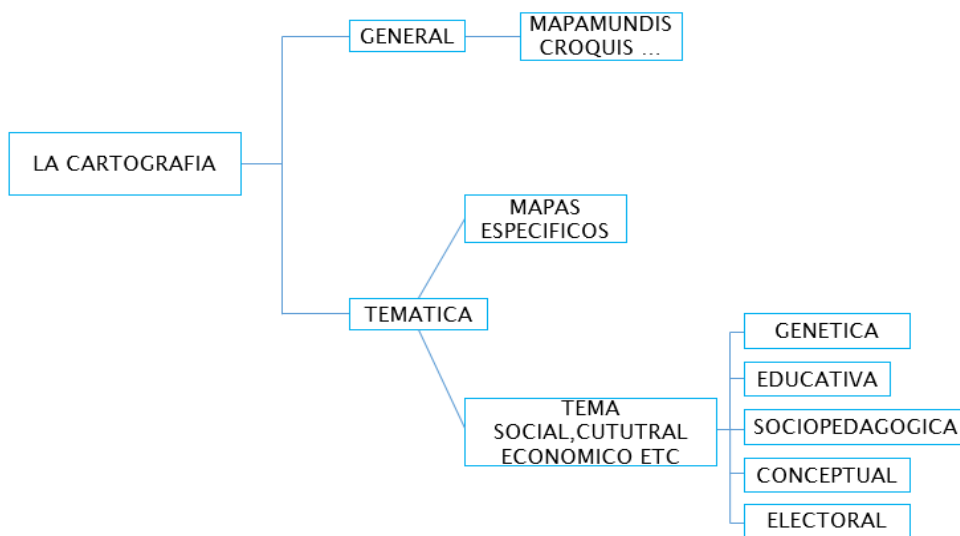


Ilustración 5 Diagrama sinóptico de los tipos de cartografía. (Imagen Propia)

La cartografía general, dentro de la cual se encuentran, mapamundis o croquis, implica una visión global del objeto de estudio, es decir aquella que muestra sus

relaciones más generales, sin entrar en mayor detalle o especificidad. Por ejemplo, esta cartografía permitiría representar las relaciones que subyacen a la definición de onda electromagnética, y a sus ecuaciones generales.

La cartografía temática, implica una visión detallada del objeto de estudio, en cuanto permite establecer, relaciones que constituyen cada uno de los aspectos que configuran, dicho objeto de estudio, además de posibilitar la construcción de los mismos, para dar cuenta de dicho aspecto en su complejidad, es por ello que dentro de esta categoría, encontramos la cartografía conceptual, que permitiría, describir como el concepto de onda electromagnética está relacionada con una visión teórica de campos, con la teoría electromagnética, y con una fenomenología y unos experimentos, entre otros aspectos.

Desde distintos campos disciplinares, se han venido desarrollando diferentes cartografías, las cuales han permitido avances y propuestas, como las que se encuentran en el trabajo de investigadores, como Sergio Tobón, Cartografía Conceptual, Diego Fernando Barragán Giraldo y Juan Carlos Amador, La cartografía social- pedagógica, Sabina Habegger y Iulia Mancilla, Cartografía Social, entre otros. Se han desarrollado investigaciones en campos; sociales, políticos, Psicológicos, educativos y entre otros.<sup>3</sup>

## LA CARTOGRAFÍA COMO ESTRATEGIA

La cartografía conceptual, es una metodología propuesta por Sergio Tobón, la cual está dentro de las investigaciones cualitativas y se usa como estrategia, con el fin de hacer una construcción conceptual y teórica de algún tema o teoría.

“...estrategia de investigación cualitativa que busca sistematizar, organizar, analizar, construir, comunicar y aprender conceptos y teorías, orientando el análisis desde distintas perspectivas dentro del contexto de investigación.”

Tobón, S. (2004). La cartografía conceptual, se usa para la recopilación de información, el análisis documental, permite una selección y verificación de la información, bajo la técnica del análisis documental, con el fin de sistematizar

---

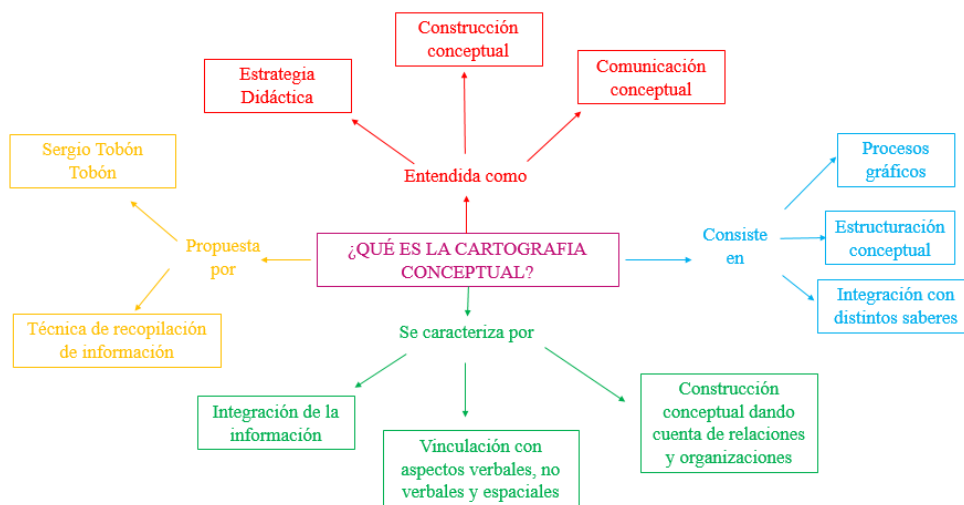
<sup>3</sup> Algunos de los trabajos nombrados anteriormente se encuentran en la bibliografía, por si desean consultarlos.

dentro de un mapeo metacognitivo el análisis, las reflexiones conceptuales y teóricas realizadas dentro de la lectura y el análisis documental.

La propuesta realizada por Sergio Tobón (2004), está dividida en cuatro elementos, los cuales son: análisis conceptual, síntesis gráfica, establecimiento de relaciones entre ejes y Producto del análisis.

El análisis conceptual, está compuesto por ocho ejes a desarrollar, el Eje de ejemplificación, se establecen ejemplos, experimentos, aplicaciones y situaciones de estudio entre otros, que permitan ilustrar el concepto que se quiere desarrollar, el Eje nocional, busca dar una definición del concepto, el Eje Categorical, clasificar el concepto buscando sus relaciones y sus subcategorías de clasificación, el Eje de Caracterización, clasifica y establece las características, del concepto, el Eje de diferenciación, como se distinga de otros conceptos, Eje de subdivisión que tipo o clase de concepto es y si está inscrito en alguna teoría, y el Eje de vinculación, busca la relación con otras disciplinas o conceptos. Ilustración (6).

*Ilustración 6 Mapa mental de lo que es una cartografía conceptual. (Imagen Propia)*



Como se dijo anteriormente, este trabajo solo considerara solo 3 de los ejes de la cartografía conceptual, ya que responden a los objetivos que se plantean; estos ejes son: categorización, vinculación y ejemplificación, además estos tres ejes, se desarrollan con el fin de hacer una recontextualización para la enseñanza del

concepto de onda electromagnética; esta recontextualización, implica un trabajo de interpretación de los conceptos y teorías científicas, en relación con una problemática para la enseñanza, en este caso las ondas electromagnéticas, para ello se requiere realizar un análisis de algunos textos de Heinrich Hertz, en los cuales es desarrollado dicho concepto.

La investigación estuvo enmarcada bajo tres ejes que se mostraron en la tabla 3, de tal manera que esta tenga orden y sobre todo sea sencillo evidenciar los diferentes aspectos que componen a un concepto como es la onda electromagnética, además de poder centrar y delimitar el trabajo bajo esos mismos aspectos.

<b>EJES PROPUESTOS PARA LA INVESTIGACIÓN</b>	<b>RECONTEXTUALIZACIÓN</b>
CATEGORIZACIÓN	
VINCULACIÓN	
EJEMPLIFICACIÓN	

El eje de la categorización, Se establece la categoría en la que está enmarcada las ondas electromagnéticas, que es todo el desarrollo del electromagnetismo, y algunas de las problemáticas que estuvieron a la base para constituirse como teoría, además de los aportes que se habían dado, frente a la posible existencia de las ondas electromagnéticas.

Tabla 3 Muestra los ejes propuestos para esta investigación. (Imagen Propia)

El eje de la vinculación, Se hace un desarrollo del cómo se concibieron las ondas electromagnéticas, estableciendo lazos con el electromagnetismo, desde la perspectiva de campos, teniendo algunas de las problemáticas que estuvieron a la base de su constitución como onda electromagnética.

El eje de la ejemplificación, Se establecen ejemplos, experimentos, aplicaciones y situaciones de estudio, entre otros, que permitan ilustrar el concepto que se quiere desarrollar; para el caso del concepto de onda electromagnética, se tendría los ejemplos de la radiación térmica, ondas de radio, la luz, entre otros; los experimentos que plantea Hertz, para su producción y detección.

Además, dentro de cada uno de los ejes desarrollados, se delimitarán y construirán los diferentes criterios para su enseñanza, por esto se construirá una

recontextualización con la cual, se busca identificar las problemáticas que llevaron a Heinrich Hertz a determinar la existencia de las ondas electromagnéticas.

Es importante señalar que para la selección y organización de la información fue necesario establecer características que estas fuentes deben cumplir, dicha búsqueda estará enmarcada por los siguientes criterios de selección:

- Deben ser de naturaleza académica o investigativa, como artículos, libros o capítulos de libros, partiendo de la obra de Heinrich Hertz de las ondas electromagnéticas.
- Deben aportar a la construcción conceptual de lo que es una onda electromagnética.
- Abordar elementos de enseñanza-aprendizaje, que contribuya a la construcción de los criterios de enseñanza.

La selección de las fuentes, fue un trabajo meticuloso, pues se debía tener de presente los criterios antes presentados, con el fin de analizar y reflexionar frente a cada una de las fuentes y consigo poder desarrollar la cartografía bajo la recontextualización de saberes sin dejar de lado cada uno de los ejes que mostraran una forma de organización cartográfica de las ondas electromagnéticas, presentada en el siguiente capítulo.

# CAPITULO 3

## DESARROLLO DE LA CARTOGRAFÍA CONCEPTUAL DE LA ONDA ELECTROMAGNÉTICA

### EJES DE INVESTIGACIÓN DESARROLLADOS

#### 1. EJE DE LA CATEGORIZACIÓN

Isaac Newton hacia 1687 publica su obra de los Principia, la cual “puede ser considerada como la obra que culmina la «primera revolución científica»” (Gamez, 2007), de la humanidad, esto implicaba nuevas doctrinas, las cuales debían seguir ese orden y condiciones dadas en la gran teoría de la época, por esta razón no eran aceptadas otras posturas y perspectivas distintas a la de Newton era casi que un dogma de la época. Descartes tenía la idea de la acción gravitacional, la cual fue rechazada pues se salía de los paradigmas Newtonianos, sin embargo, años más tarde, para la mitad del siglo XIX, estos paradigmas empezaron a ser interrogados, pues existían fenómenos físicos que no podían ser explicados con esta teoría, fenómenos como los eléctricos y magnéticos.

Coulomb hacia el año 1785 habría publicado sus avances experimentales donde establecía las fuerzas de repulsión y atracción, lo cual se daba por las intensidades y distancias que los separa, para ello uso un aparato muy parecido a la balanza de torsión, con ello estableció dichas afirmaciones, tiempo después Ampere también se interesó por trabajar con estos fenómenos, pero él lo realizó desde las concepciones newtonianas, explicando así las interacciones de las cargas y la corriente, a partir de la acción a distancia, su trabajo fue publicado en 1827 y gracias a los avances que éste logro al establecer la ley conocida como la ley básica de la acción eléctrica, la cual le daría validez al trabajo que venía adelantando Weber, el cual explicaba a partir de una analogía entre las fuerzas de Newton y las fuerzas eléctricas, que eran caracterizadas cinemáticamente, aclarando la diferencia entre la fuerza electrostática y electrodinámica; con estos avances existió gran dominio, dentro de la misma

comunidad científica Alemana, de quienes conservaban y trabajaban bajo la rigidez de las leyes de Newton.

Por otro lado en Gran Bretaña, también se adelantaban trabajos acerca de este mismo tema, uno de ellos fue el de Michael Faraday, quien a su vez tuvo en cuenta trabajos como el de Oersted quien había encontrado la relación de la fuerza magnética y la eléctrica, la cual le ayudaría a Faraday a demostrar el principio de los motores, que explica como una corriente en una bobina genera rotación en un imán que se encuentra en su proximidad; además Faraday, logra demostrar y definir la inducción electromagnética (1831), la cual define a partir del flujo magnético, se dice que *“Faraday crea una nueva metafísica de teorías de campo”* (Berkson, 1985). Siendo así un gran experimentalista, de la época y de la historia en general, quien logra poner de manifiesto su inconformidad al tener que estudiar la electrostática separada de la electrodinámica, sin embargo, no tuvo ninguna relevancia en su época, al igual que tampoco lo fueron muchos trabajos experimentales en los que logro avanzar, y de los cuales dejo constancia en notas y diarios de campo, los cuales fueron muy importantes tiempo después cuando se dio la consolidación de la teoría electromagnética de campos de Maxwell.

Maxwell quien conoció el trabajo de Faraday, por medio de Thompson amigo cercano de Faraday logra definir matemáticamente, lo que Faraday había hecho experimentalmente, las líneas de fuerzas aunque las ve por primera vez Faraday, Maxwell logra explicarlas a través de un sistema hidrodinámico, el cual sustituye dichas líneas por tubos de corriente, dando sentido al campo y a la fuerza eléctrica, y a su vez creando un término importante, la intensidad , otro de los aportes de Maxwell fue atribuirle propiedades físicas al éter, con el fin de caracterizar el Campo electromagnético, además logra explicar la luz como una onda transversal, pero sobre todo logra unificar los fenómenos eléctricos, magnéticos, ópticos y electromagnéticos, en una sola teoría, como lo explica en un fragmentos Belendez:

“Esta "síntesis de Maxwell” constituye uno de los mayores logros de la física, pues no solamente unificó los fenómenos eléctricos y magnéticos, sino que

permitió desarrollar toda la teoría de las ondas electromagnéticas, incluyendo la luz. De este modo, a partir de Maxwell, otra parcela de la física hasta entonces independiente, la óptica, quedó en cierta medida englobada en el electromagnetismo.” (Beléndez, 2008).

Sin embargo, para la época, no fue bien recibido ni mucho menos aceptado por la comunidad científica, pues abandonaba la idea de acción a distancia del gran Newton, única teoría aceptada y validada en la época, cualquier avance que se diera debía girar o darse en torno a esta teoría, además la matemática en la que fue presentada la teoría de Maxwell no era muy típica en la época, asimismo al enunciar la posible existencia de ondas electromagnéticas, resultaba controversial para la comunidad científica de la época la idea y posible existencia de estas.

## 2. EJE DE VINCULACIÓN

Mientras Maxwell trabajaba en sus investigaciones desde las islas británicas, desde Europa también lo hacía Hermann Von Helmholtz, dentro de una de sus cátedras, cuestiono y comparo cada una de las teorías electromagnéticas existentes, en su momento dijo: *“La teoría de Faraday a la que el Sr Maxwell ha dado la expresión matemática..., niega totalmente las fuerzas a distancia y en su lugar pone únicamente las acciones transmitidas por una polarización de un medio continuamente”* (Doncel & Roque, 1990), Donde planteaba ciertas problemáticas que presentaban las teorías existentes; cabe aclarar que Helmholtz, reconoció y resaltó el gran trabajo realizado por Maxwell <sup>4</sup>*“Helmholtz fue el primer científico continental europeo en apoyar la teoría de Maxwell”* (Bryant , Giora , & Doncel , 1998), algunas de esas problemáticas era el del valor de  $k$ , que le daba Maxwell (0) y Weber (1), donde  $k$  es un coeficiente de elasticidad del medio o al menos ese era el significado que tenía desde la teoría de Maxwell, dichas problemáticas fueron enviadas a la academia de ciencias de Berlín.

---

<sup>4</sup> *“Helmholtz was the first continental European scientist to support Maxwell's theory”.*

Hacia 1879 la academia de ciencias de Berlín lanza su concurso sobre la polarización y la relación electrodinámica, quienes buscaban que sus participantes demostraran que:

1. <sup>5</sup> 1 sobre la cuestión de si la corriente eléctrica está conectada a un transporte masivo.
2. Se deben demostrar los efectos electrodinámicos dentro de los aisladores que habían sido exigidos por Faraday y Maxwell. (Wiederkehr, 2007)

Debían cumplir con un experimento que comprobara la posición en contra o a favor, del investigador, además de que solo se podía enviar el artículo antes de 1882, el premio sería entregado en la reunión pública de la Academia en el aniversario de Leibniz en julio de ese año. En ese entonces Hertz era pupilo de Helmholtz quien lo animo a participar, además de poner a su disposición los laboratorios de Karlsruhe, donde se graduó como doctor en física, luego de haber desarrollado toda una investigación “*Sobre fenómenos de inducción producidos por procesos eléctricos en aislantes*” (Doncel & Roque, 1990), Heinrich Hertz participo y fue ganador, el 3 de agosto de 1879, El museo de ciencia en Londres conserva el manuscrito original de Hertz, titulado “*Comprobación de las acciones eléctricas en dieléctricos agosto- octubre 1879*”, un año después recibió su doctorado, fue ayudante de su profesor hasta 1883, Hasta que le ofrecieron una cátedra en Kiel.

Hertz desde 1883 hasta finales de 1885, estuvo trabajando en Kiel, donde estaba alejado de los laboratorios, lo cual logro deprimirlo, debido a que a él le gustaba mucho estar en ese lugar, por otro lado, en Kiel a diferencia de Berlín le daba más tiempo para reflexionar y pensar, pues tenía mucho más tiempo libre. Tal vez por esto tomaría la decisión de construir un electrómetro, el cual pensaba usarlo en algún laboratorio, pues emprendía una investigación frente a los rayos electromagnéticos y a la teoría electromagnética de la luz, podían tratar temas

---

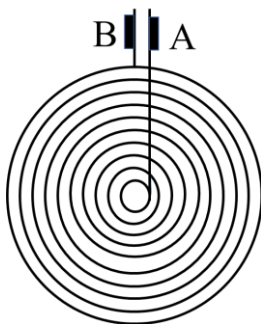
<sup>5</sup> 1. on the question of whether the electric current is connected to a mass transport.

2. *The electrodynamic effects within the insulators that had been demanded by Faraday and Maxwell must be demonstrated.* Traducción del inglés al español, realizada por el autor del texto.

como la dispersión y la rotación óptica, es así como inicia leyendo algunos autores como Kant, Fechner entre otros. Tal vez por esto llegaría al tratado de Maxwell, con el cual intento en algún momento deducir las ecuaciones del mismo, sin tener en cuenta el éter, además de asumir que la fuerza tomaba tiempo para viajar de un lado a otro, aspecto era algo complicado, debido a que en ese momento habían tres formas particulares de electrodinámicas vigentes, La de Maxwell, Weber y su mentor Helmholtz, esta última era la más conocida por Hertz, sin embargo, él las quería entender además de encontrarles similitudes para tratar de unificarlas, lo cual fue un intento fallido, debido a las distintas percepciones que hay en cada una de ellas. Sin embargo, logra establecer que:

- Una carga  $q$  puede ser movida por otra carga  $q$ .
- Un cuerpo con corriente  $C$  puede ser movido por otra corriente.
- Una corriente puede ser cambiada por otra corriente cambiante.

Los trabajos que adelanto Hertz fueron, teóricos, además de estar entorno a las teorías electrodinámicas vigentes en la época, durante su estadía en Kiel, lidio con la frustración de no poder trabajar en un laboratorio, con la pérdida de su hermano, y con el dilema de no poder entender las teorías electrodinámicas de la época.



Para 1886 estando ya en Karlsruhe, y con un poco más de claridad frente a las teorías electrodinámicas, da inicio a su labor. En otoño mientras se preparaba para una clase, estaba usando dos espirales de Riess, los cuales pensaba usar para explicar la inducción electromagnética, estos dos son conductores que en sus terminaciones tienen unas bolas de

metal, si se colocan estas dos espirales una encima de la otra, produciría de la bobina de inducción.

En efecto se verían chispas como demostración de la inducción, al usar dos de estos espirales (observar la ilustración 7), sin embargo Hertz empezó a “jugar” con estos elementos, incluso con otros como la botella de Leyden, cuando incluyo este otro elemento se dio cuenta de que seguía produciendo chispas, lo cual lo sorprendió debido a que él esperaba que por la debilidad de la corriente

*Ilustración 7 Espiral de Riess.  
(Imagen Propia)*

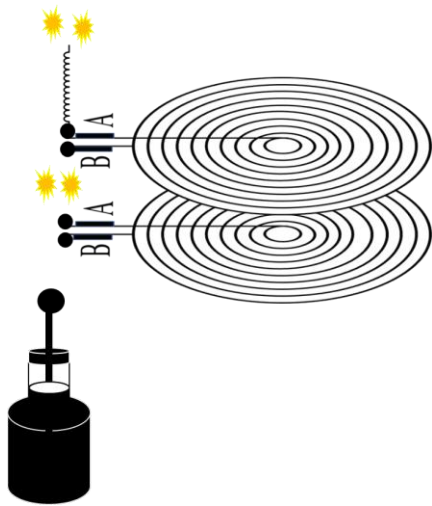


Ilustración 8 Experimento, con el cual buscaba desaparecer la chispa o por lo menos debilitarla. (Imagen Propia)

que éste logra producir no sería capaz de generar chispas, por esto decide poner una pequeña bobina de inducción en el espiral de encima, con el fin de debilitarlo aún más y que dejara de producir estas chispas, asimismo se sorprendió mucho al ver como este espiral producía chispas, desconcertando a Hertz, observar la ilustración (8) ya que en efecto se estaba produciendo una descarga de ambas partes, pero aun así aparecían chispas. Al observar esto, empezó a jugar con los elementos en su laboratorio, pensó que de pronto cambiando la forma de la espiral podría alterar el resultado, efectivamente al realizar este cambio, se produjo la chispa con más intensidad, lo cual intrigo mucho a Hertz y es así como decide emprender una investigación, con el fin de determinar la extraña capacidad estimulante de la chispa y generar una explicación entorno a esto. Tenía claro que, por medio de la inducción electromagnética, no se estaba dando, ya que no era lo suficiente potente como para producir una chispa. Hertz pensaba que era de pronto algún terreno que no habría abordado la electrodinámica, a lo que llamo terreno de la electrodinámica inexplorada, pues no tenía idea alguna de por qué sucedía eso.

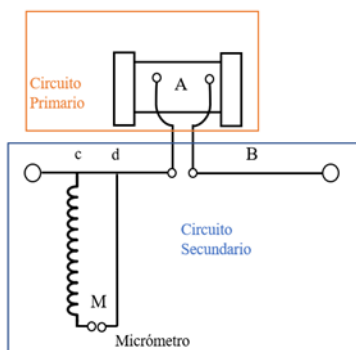


Ilustración 9 Experimento, con el cual buscaba determinar la capacidad de la chispa. (Imagen Propia)

En ese momento él pensaba que eso tenía que ver por los cables de descarga, por esto para él era importante determinar qué era lo que sucedía con estos cables y como se daba realmente la chispa, claro estaba que sin importar la respuesta, el medio debía estar dado por la fuerza electromotriz y que esa causa vendría dada por esa potencia inductiva o eso pensaba en ese momento, por esto él quiso buscar un aparato que le ayudara a revelar esa diferencias de potencial entre

los puntos más cercanos (C y D), (Ver ilustración 9), por esto decide hacer uso de un micrómetro el cual sirve para medir el potencial de un circuito.

Incluir otro elemento como un micrómetro, fue casi inútil debido a que éste no cumplió el objetivo principal que era medir el potencial, pero si permitió ver a través del micrómetro unas pequeñas chispas las cuales le generaron problemas a Hertz, así que decide buscar la manera de desaparecer estas chispas, esto fue caso perdido pues no logro desaparecer las chispas del micrómetro.

Este nuevo problema puso a Hertz, en otro dilema, era lograr establecer que producía dicha reacción, porque no se pudieron quitar esas chispas y a que se debía esto; para su asombro, se dio cuenta que efectos parecidos se daban con los cables de protección de rayos para la telegrafía, no obstante seguía sin entender ¿Por qué no podía desaparecer el efecto?, lo cual lo tuvo inquieto un tiempo hasta que decide suspender uno de los cables del micrómetro, como intentando acortar la trayectoria de la “chispa”.

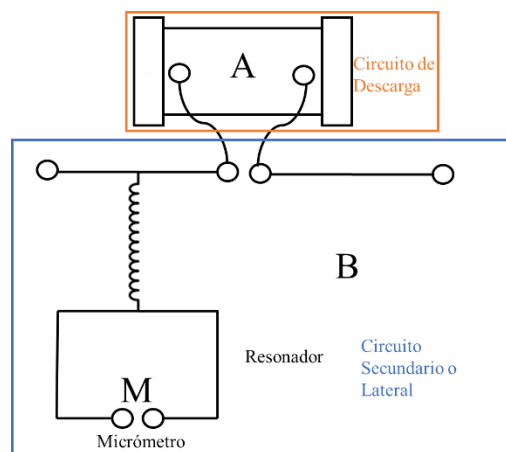


Ilustración 10 Modificación del experimento, inmediatamente anterior con el cual buscaba desaparecer la chispa. (Imagen Propia)

Sin embargo, fue un intento fallido debido a que se seguían viendo, las chispas, entre las perrillas del micrómetro, además se podía observar que: <sup>6</sup>“La brecha en el circuito de descarga no solo tenía la capacidad de hacer que ese circuito actuara inductivamente incluso con bobinas débiles que lo estimulaban, sino que aparentemente no lo hizo de la manera más probable”. Pág. 222 (Buchwald, 1994). Ahora su concentración se

daba en el micrómetro, tratar de entender qué sucedía con éste, en un primer momento lo llamo circuito lateral; al suspender aquel cable había logrado deducir que las chispas aumentaban en longitud al ser

<sup>6</sup> “Not only did the gap in the discharge circuit have the ability to make that circuit act inductively even with weak coils stimulating it, it apparently did not do so in the most likely way”. Traducción de las ingles al español realizada por el autor del trabajo.

conectadas a fuentes de gran poder, sin embargo, no entendía por qué ese circuito lateral reaccionaba así.

Al poder establecer algunas afirmaciones, a través de sus observaciones, también establece algunos factores, que lo ayudarían a establecer la verdadera razón, sin embargo, excluía que uno de esos factores fuera las grandes corrientes pues se había dado cuenta de que eso era algo que no afectaba directamente la chispa. Por esto empieza a creer que la razón estaría en el circuito secundario o lateral como lo llama él, pues era consciente de que era en éste donde se observaban cambios significativos, por esto era importante determinar las propiedades que permitían ese comportamiento, en particular para ello determino inicialmente que:

1. El grosor y el material no inciden ni determinan la chispa.
2. Entre más grande sea la longitud del circuito secundario, más larga será la chispa.

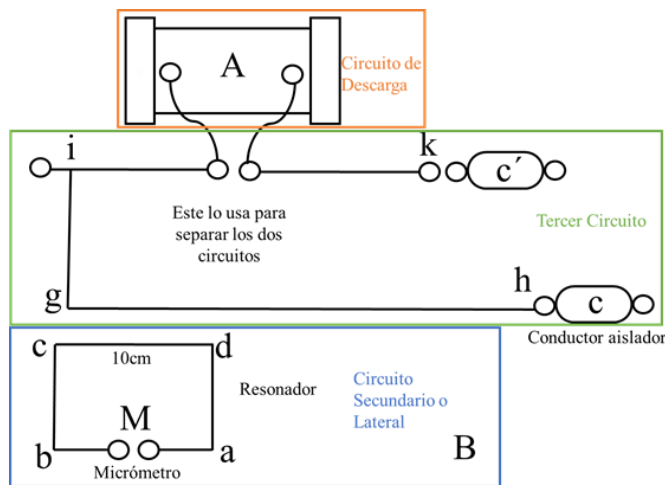
Este comportamiento del circuito secundario se enmarcaría como indicador de algo, que no se le había hecho gran hincapié hasta ese momento, era el cambio de variación de un punto a otro, ese circuito secundario: <sup>7</sup>“... *Se había convertido en un detector de propagación eléctrica que había sido engendrada por la extraordinaria descarga de las chispas en el circuito de descarga*”. Pág. 225 (Buchwald, 1994). Según Hertz en ese momento, el “chisporroteo” del circuito secundario se daba a una velocidad finita “X”, de las perturbaciones que se propagan a través de él, dependiendo del mismo comportamiento de la descarga de la chispa, retrasando en si la ruptura del circuito por un momento, momento suficiente para acumular carga para luego desencadenar en un pulso. Al tener estas primicias, Hertz quería determinar si era o no controlable esto y de ser así determinar hasta qué punto lo era.

Hertz logra determinar que esos efectos que habría logrado ver, por medio del chisporroteo, debía darse por una especie de autoinducción, esto debido a una fuerza electromotriz, ya que la corriente es cambiante en el circuito, lo que lo

---

<sup>7</sup> “... *It had become an electrical propagation detector that had been generated by the extraordinary discharge of sparks in the discharge circuit*”. Traducción del inglés al español, realizada por el autor del trabajo.

hacía diferente en otros experimentos de inducción de la época, era la corriente, pues en los experimentos convencionales la corriente era homogénea, mientras que en los experimentos de Hertz, esa inducción estaba produciendo pulsos y no una contrafuerza electromotriz como se esperaba, por esto Hertz estaba tan perplejo con los efectos que estaba presenciando, esto lo respaldaba comportamiento del circuito secundario como lo llamo él, ya que gracias a estos fenómenos podrían ser confundidos con una caída de voltaje, producidas por la resistencia.



*Ilustración 11 Experimento, en el cual buscaba separar el circuito primario del circuito secundario, para ello añadió en la mitad de los dos, un circuito al cual llamo tercer circuito. (Imagen Propia)*

Hertz decide seguir jugando con su experimento, esta vez decide desconectar el segundo circuito totalmente, pero para su sorpresa éste seguía chisporroteando cuando se acercaba lo suficiente, lo cual desconcertó a Hertz él sabía que, en el circuito anterior, la chispa era producto de la diferencia de trayectoria de la corriente, sin embargo, al suspender cualquier tipo de

conexión directa esto tendría que cambiar, pero aun así seguían saliendo chispas, él sabía que había una razón y que debía ser la misma para los dos casos, para los dos circuitos y que esa razón debía ser por algún tipo de inducción.

Hertz intento reforzar la idea de que los efectos del circuito secundario se daban por una propagación directa es decir por una inducción por efecto, lo cual debía implicar, el estudio de los dos circuitos, tanto el de descarga como el secundario o separado como lo empezó a llamar Hertz en ese momento, esto con el fin de poder estudiar ese efecto de inducción tan sorprendente y poderoso; para ello metió un tercer circuito que separaba el circuito de descarga del circuito secundario, este tercer circuito tenía forma de c (ilustración 10), estando pegado a una de las bolitas de metal del circuito de descarga, mientras la otra punta

quedaba suelta, sin embargo logro, producir chispas muy pequeñas pero no las que esperaba, así que a ese circuito tercero le añade un conductor aislado de una máquina de electricidad, al frente de cada punto del circuito tercero, esto lo hacía con el fin de atraer más electricidad en esos puntos. Es así como consigue una chispa de casi dos milímetros de largo.

Hertz sabía que esas chispas no podían ser producto de la electrodinámica sino más bien efectos electrostáticos, gracias a la carga adquirida por C como aparece en la ilustración 11 ya que el punto k y h están a distancias diferentes de las perillas del micrómetro produciendo así una diferencia materializada en la chispa. Empieza a “jugar” ahora con C cambiándolo de postura (ilustración 12) con el fin de ver el comportamiento de la chispa, cuando lo puso cerca a g la chispa bajó, en este punto los cálculos no podrían decir nada, pero lo

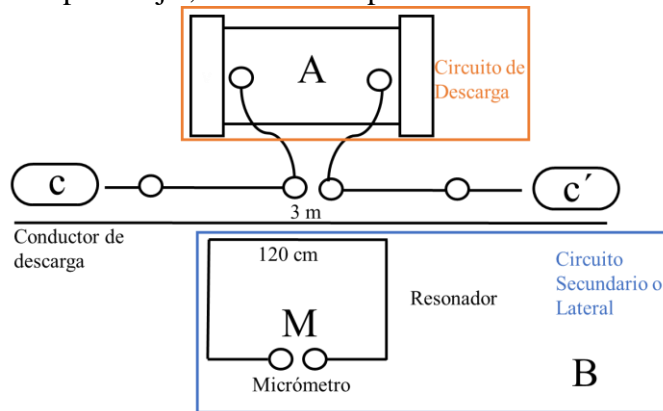


Ilustración 12 Experimento con el cual buscaba, establecer que era lo que producía la chispa. (Imagen Propia)

a la inducción electrodinámica entre "simples tramos rectos de alambre"; pero la pregunta seguía siendo por qué eran tan inusualmente poderosos” (Buchwald, 1994). Para Hertz la respuesta estaría en que esa perturbación tendría que ver con algo de naturaleza “oscilatoria”, esto lo decía ya que conocía el trabajo de Fedderson, de las corrientes oscilante, desarrollado años anteriores a él, entre 1854 y 1866. La pregunta sería cómo este aparato podría producir algo parecido a la descarga oscilatoria.

Aunque desde el inicio, intuyo que dentro de esto existían oscilaciones de algún tipo, en ese momento decidió, preocuparse por establecer el valor de la velocidad del pulso en movimiento, pero no de la acción acumulada “la chispa”, Así que

experimental si, por esto fue que se basó mucho en los aparatos que uso y jugo con ellos con el fin de buscar una respuesta, Hertz estaba muy preocupado por convencer a sus lectores de los hechos que estaba viendo, era tratar de explicar que: “los efectos se debían efectivamente

decidió seguir manipulando el circuito secundario con el fin de intensificar la chispa, para ello intento separar las perillas, debilitando así el efecto sin hacerlo desaparecer, además coloco otro conductor enfrente de k, describiendo sus hallazgo como: <sup>8</sup>*"Entonces, las chispas se volvieron muy activas, y al dibujar las perillas micrométricas aún más separadas, se pudieron obtener chispas decididamente más largas que al principio [es decir, en ausencia de C']". Este aparato será la columna vertebral de las investigaciones que se aventuraría a realizar. Página 230 (Buchwald, 1994).* Hertz creía que sus experimentos eran los suficientemente sólidos como para demostrar la existencia de las oscilaciones regulares.

Era importante en este punto pensar el circuito de descarga, pues debía cambiar, al añadirle otros dos aparatos como lo fue C y C', convirtiéndolo en "oscilador conmutado por chispas", como lo llamo Hertz. Explicando así el funcionamiento de ese circuito como:

*"La bobina de inducción cargó primero estos terminales de alta capacitancia hasta que la fuerza electromotriz entre ellos fue suficiente para romper el espacio de aire. En ese punto, el circuito de descarga se convirtió, según creía Hertz, en independiente del circuito de la bobina de inducción, a pesar de que permanecían conectados. La función de la chispa, como ahora la veía Hertz, era comportarse como un interruptor de acción rápida", convirtiendo así en un circuito de descarga en una entidad electrodinámica autosuficiente, donde el comportamiento de la chispa dependía: "de una propiedad especial y sorprendente de la chispa eléctrica que no podría ser prevista por ninguna teoría" Página 3; (Hertz , 1962).*

En este punto ya había logrado establecer algunas cosas más, sin embargo, no había logrado establecer que era lo que realmente producía las chispas, así que volvió sobre su ultimo experimento, con el fin de encontrar más respuestas, por lo cual logra modificar este último experimento poniendo ahora de cada lado del

---

<sup>8</sup> *"The sparking then again became very active, and on drawing the micrometer-knobs still farther apart decidedly longer sparks than at first [i.e., in the absence of C'] could be obtained. This successful manipulation constitutes the invention of the linear, spark-switched oscillator, a device that Hertz was to use again and again". Traducción del inglés al español, realizada por el autor del trabajo.*

circuito de descarga, dos conductores de descarga C y C', dejando el circuito secundario intacto como se ve en la ilustración 13.

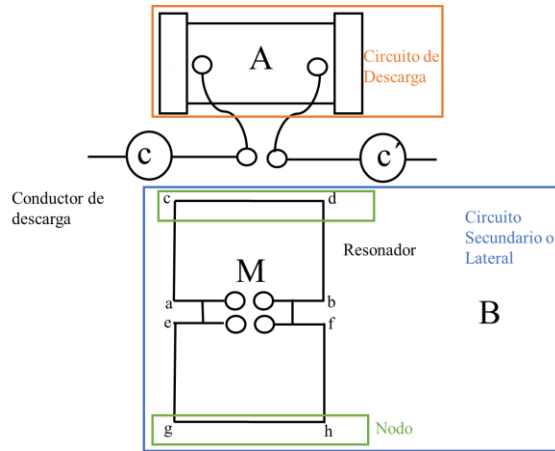


Ilustración 13 Experimento el cual buscaba observar los puntos nodales, además de tratar de aumentar la chispa. (Imagen Propia)

Cuando realizó esta modificación logro que el potencial inductor aumentara, debido al incremento de la distancia, que era considerablemente grande, 3 metros aproximadamente, entre los dos conductores de descarga C y C', y en el circuito secundario de 120cm por 80 cm, a diferencia de la inicial que no pasaban de 10 cm. Estas nuevas modificaciones de dimensiones, lograron demostrar que había energía dentro del circuito pero

que además las chispas se volvieron más grades de 2mm a un metro de distancia de chispa, lo cual no hizo esperar la carta comunicando a su mentor los avances que había logrado hasta ese momento. Ya en este punto había logrado descubrir la acción inductora y se había evidenciado por la adición de capacitancia a ambos extremos del circuito, lo cual le daría más ideas y claridad, frente a la posible existencia de ese fenómeno electrodinámico no estudiado anteriormente.

Este último experimento buscaba detectar como cambiaba la polarización de la corriente, por la acción electromotriz en la bobina, pero tampoco fue pensado para dar solución a la problemática planteado en Berlín pues en su totalidad, como se pensó en algún momento, su investigación que inicio como un juego de cambio de forma con los espirales de Riess, no tenía ni objetivos ni hipótesis iniciales, La problemática a la que hacen referencia era la de *“establecer experimentalmente cualquier relación entre las fuerzas electromagnéticas y la polarización dieléctrica de los aislantes.”*. (Doncel & Roque, 1990). Para intentar entender el comportamiento del circuito secundario, pero sobre todo del circuito en general, planteó algunas razones por las que él creía que eran posibles; en un inicio sabía que el circuito secundario, tenía o era estimulado por algo, llamando así las oscilaciones producidas por este circuitos como: vibraciones naturales,

como propias del sistema, lo explica detrás de la metáfora del martillo cuando golpea la puntilla, este genera que el clavo o puntilla vibre naturalmente como respuesta al golpe, algo similar sucede con el circuito secundario al estar expuesto al cambio de corriente. Con esto debía redireccionar la investigación a la caracterización y producción de dichas “vibraciones naturales” como le llamo les llamo él.

De este modo el circuito secundario podía ser considerado como un resonador, el cual *lo* caracterizo así por cuatro razones principalmente:

1. Había encontrado un nodo (Punto donde se mantiene constante el potencial) dentro del circuito secundario, lo cual lo pudo relacionar con la problemática de Berlín.
2. Pudo presenciar que el circuito secundario, suena como una campana golpeada por un martillo, debido a los impulsos del circuito de descarga.
3. Estableció que para que se dieran estos comportamientos el circuito de descarga debía tener unas oscilaciones regulares
4. Logro establecer que ese circuito era como un péndulo impulsado en lugar de una campana golpeada, por su comportamiento.

El hecho de constituir el resonador, le permite a Hertz construir nuevas investigaciones en torno a las oscilaciones, para esto considero manipular el ultimo circuito, con el fin de cambiar su periodo de oscilación, para ello agrego conductores a los polos de descarga, además de agregar unos cables paralelos en las terminaciones, todo esto para debilitar la chispa, y demostrar así el efecto marcado del resonador.

Hertz sin duda alguna al ir variando cosas iba desviando lentamente su atención del circuito de descarga y se centraría en la resonancia con el fin de manipular los armónicos, buscando y cambiando los nodos del circuito. Es así como decide añadirle a ese último circuito un segundo resonador, de los cuales establece que entre el punto c y d hay un nodo y que posiblemente entre g y h existe otro nodo. Sin embargo, las chispas se redujeron drásticamente de 3 mm a 1 mm, algo que no llamo mucho la atención de Hertz, sino más bien decidió cortar las perillas

un poco, produciendo ahora un único nodo entre a y e con lo cual Hertz habría logrado construir un resonador capaz de detectar armónicos. <sup>9</sup>*“Los resultados ya descritos solo se obtuvieron mediante una cuidadosa atención a los detalles insignificantes; por lo que parecía probable que las respuestas a otras preguntas resultaran más o menos ambiguas.”* Citado por Buchwald en 1994. (Hertz 1887a, pág.49). Pág. 238.

Como ya se ha dicho Hertz no tenía ningún propósito investigativo alguno, solo quería saciar su curiosidad, la cual iba tomando más fuerza cada vez que le realizaba algún cambio al experimento inicial, por ello en un inicio Hertz se despreocupó de los cálculos, incluso de la teoría, para él era más importante los experimentos, por esto su preocupación central fue demostrar su existencia experimentalmente, sin desconocer la relevancia que tenían estos aspectos en ese momento, toda teoría debía tener una base experimental y matemática para que pudiera tenerse en cuenta. Hacia 1886, Hertz habría construido un dispositivo muy novedoso, habría logrado ver muy claramente el efecto de la inducción de una corriente abierta, le daba muchas esperanzas en medio de todo lo que había comprobado. Hertz sabía que esto que estaba evidenciando no era muy usual así que, para el año de 1886, decide emprender una investigación entorno a ese efecto inusual que se estaba presentando en sus experimentos, para ello empezó a meter otros aparatos dentro de sus experimentos con el fin de ver su comportamiento. Uno de ellos fue un micrómetro de Riess, al cual le introduce un bucle, a este circuito decide llamarlo secundario, ya que luego de varias descargas se logra convertir en un resonador, produciendo así fenómenos de resonancia entre dos oscilaciones eléctricas. Lo cual seguía produciendo dudas en Hertz, pues no entendía que estaba sucediendo con las chispas, si existía alguna relación con la distancia del resonador y el oscilador. Con esto buscaba responder todas las preguntas de Berlín, ya que algunas las había dejado sin responder, recordemos que Hertz en el momento en que presenta la solución ante

---

<sup>9</sup> The results already described were only obtained by careful attention to insignificant details; and so, it appeared probable that the answers to further questions would turn out to be more or less ambiguous. (Hertz 1887a, p. 49). Traducida del inglés al español por el autor del trabajo.

la académica de Berlín dijo que con los aparatos existentes no era posible crear semejantes efectos debido a que no tenían suficiente potencia.

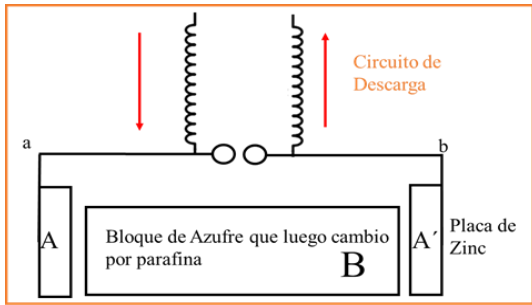


Ilustración 14 Experimento con el cual buscaba, observar algunos efectos en los dieléctricos. (Imagen Propia)

Luego de esto, una vez más decidió hacerle unas modificaciones a el experimento, en esta oportunidad pone dos placas A y A', además de introducir un bloque de azufre inicialmente, el cual lo cambia por parafina, (observar la ilustración 14), se empezaba a creer en la existencia de la fuerza electrostática.

Hasta ese momento nadie se había preocupado por los efectos electrostáticos en un circuito cerrado, sin embargo, era lo único a lo que se le podía atribuir ya que había solo

dos únicas fuerzas electromotriz dentro de él, observar Ilustración 15. Hertz observo que la chispa de ese resonador no era muy luminosa, sin embargo, el

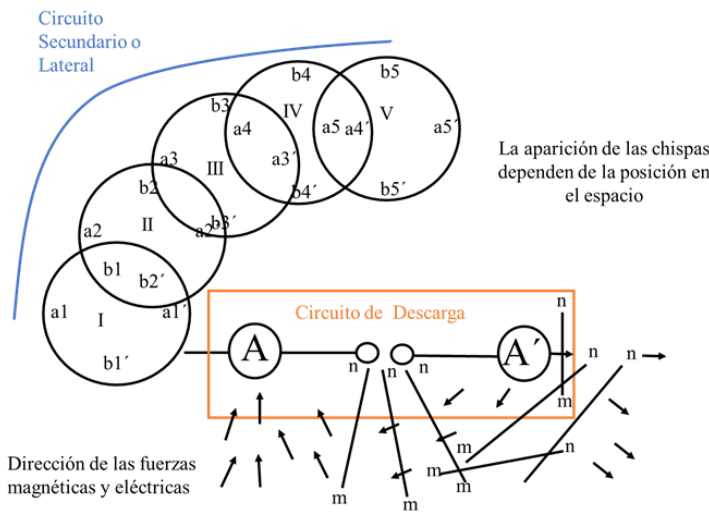


Ilustración 15 Muestra el comportamiento de las chispas, a partir de la posición del circuito secundario con respecto al primario. (Imagen Propia)

decide medirla con ayuda de una caja oscura, Años más tarde esto se conocería como el efecto fotoeléctrico.

Ese mismo año para el 7 de septiembre, volvió a su laboratorio esta vez usando un conductor de inducción móvil, luego de dos semanas de explorar tentativamente de la fuerza eléctrica y la exactitud del oscilador, con

esto buscaba demostrar la existencia de los efectos dieléctricos. Este nuevo experimento constaba de dos partes:

- Primario: El oscilador

- Secundario: El resonador

Este experimento era muy parecido al primero, el que había realizado nueve meses antes, Cambio de forma, las placas A y A', se dio cuenta que las chispas dependían de la posición del espacio, por esta razón decide hacerlas circulares, pues al tener esta forma permitirá ponerlo en cualquier posición.

El círculo del circuito secundario, es un poco más grande con el fin de variar la longitud, del aparato, concluyo así que las fuerzas eran simétricas, para ello uso una analogía con una cuerda.

“<sup>10</sup>Hertz afirmó que las fuerzas alejadas del espacio son más efectivas para producir una oscilación que las fuerzas opuestas cercanas a él, porque, argumentó, la corriente termina en los límites del espacio. Esta es, como él sabía y comentó, una "declaración algo breve", pero llegó a ella por analogía

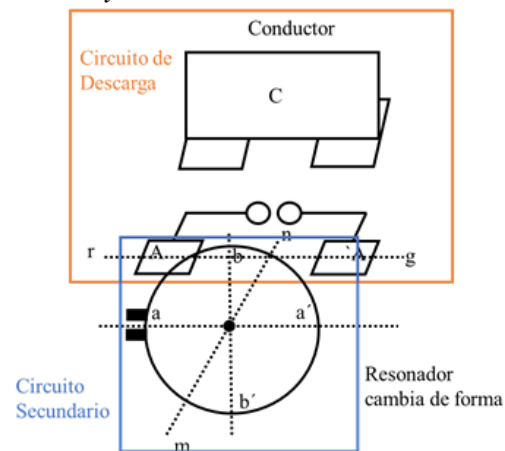


Ilustración 16 Cambia la forma del resonador a circular con lo cual buscaba observar su comportamiento. (Imagen Propia).

con la vibración de una cuerda atada en ambos extremos. Si, argumentó, las fuerzas cercanas al centro de la cuerda se oponen a las que están cerca de sus extremos atados, entonces la primera gobernará sus movimientos si las fuerzas centrales oscilan en sincronía con la "nota fundamental de la cuerda". Aquí la corriente corresponde al desplazamiento de la cuerda, y los extremos de la brecha (donde cesa la corriente) corresponden a los extremos de la cuerda.”

(Buchwald, 1994).

Aunque con el experimento de las esferas alcanzo cosas y definir algunas otras, Hertz decidió diseñar un experimento nuevo, donde ya no había esferas si no un

<sup>10</sup> Hertz asserted that the forces far from the gap are more effective in producing an oscillation than are the opposing forces near it, because, he argued, the current terminates at the gap's boundaries. This is, as he knew and remarked, a "somewhat brief statement," but he came to it by analogy with the vibration of a string tied at both ends. If, he argued, the forces near the center of the string are opposed to those near its tied ends, then the former will govern its motions if the central forces oscillate in synchrony with the "fundamental note of the string." Here the current corresponds to the string's displacement, and the gap ends (where the current ceases) correspond to the string's termini. Traducida del inglés al español por el autor del trabajo.

par de placas las cuales median aproximadamente 40 cm, además de que este tenía un conductor adicional C, recordemos que cuando el conductor era estimulado por el oscilador este producía un efecto inductivo, ilustración 16. Cuando decide cambiar las esferas por placas su principal objetivo era investigar la electrodinámica en un dieléctrico, para ello decide usar otro conductor además de cambiar las esferas por placas. Para ello, inicia separando la acción estática de la inductiva, al observar el experimento dice que debería existir una simetría que conserve las propiedades del experimento con el fin de que se den las chispas, sin embargo, se da cuenta que en el resonador entre el punto a y a', son nulos debido en que en este punto las chispas son muy pequeñas o no hay. Sin embargo, Hertz decide meter un dieléctrico de D, como lo muestra la ilustración 17 justo debajo del primer montaje, sin embargo, no logra observar mucho.

Para el 12 de noviembre, inicia una investigación con el fin de determinar la velocidad de propagación del efecto electrodinámico, Hertz no entiende por qué no se pueden analizar dos efectos de diferente tipo por separado, ya que su mentor Helmholtz, en su teoría electrodinámica impuso la separación entre dos efectos de diferentes tipos, pues en el artículo de Helmholtz de 1870 ignora que:

- El cambio de polarización puede aparecer en cualquier ecuación de corriente excepto en la ley de OHM.
- Cualquier cosa que puede afectar la corriente, también puede hacerlo con la polarización.

Hertz empezó a tener conflictos teóricos, con respecto a la teoría electrodinámica de su mentor, no entendía cómo sin tener presente estas consideración Helmholtz logra formular las preguntas de la academia de Berlín,

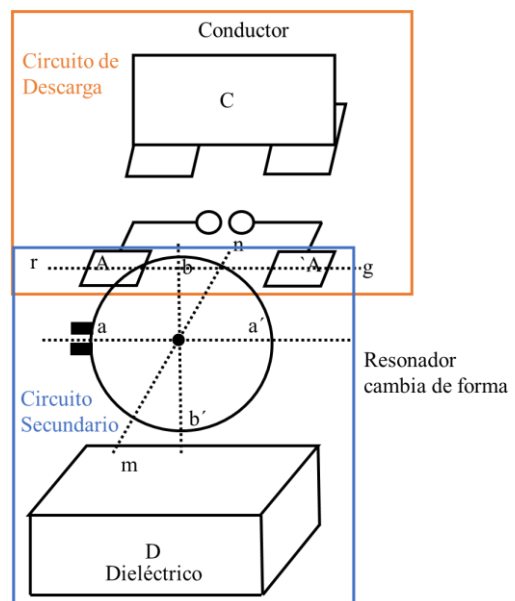
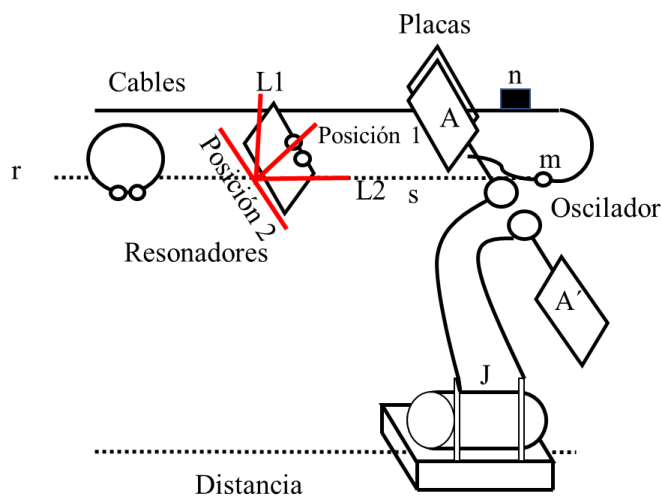


Ilustración 17 Al experimento inmediatamente anterior le añade un dieléctrico con el fin de observar su comportamiento. (Imagen Propia)

además de analizar la posibilidad de tener presente los potenciales de interacción, sin seguir evadiéndolos como se venía haciendo hasta en ese momento, pero además Hertz, no entendía como Helmholtz había logrado obtener ondas teóricamente, Hertz supuso que lo había logrado asumiendo la corriente de conducción, la cual debía ser incluida en la ecuación de continuidad junto con la corriente de conducción, de esta manera habría obtenido la propagación. Aunque Hertz en ese momento no usa la continuidad, si no que obtiene la propagación de las mismas interacciones, sin embargo, el problema de él en este momento era detectar dicha propagación.

Es así como inicia otro experimento al que le pone un cable, entre una de las placas, de lo cual dice Hertz que, donde termina el cable las chispas son muy pequeñas, pero si se mueve el resonador hacia esos puntos extremos estas desaparecen, es decir es un punto nodal. Sin embargo, Hertz quería averiguar si existían más puntos nodales, y a que distancias se daban, como lo muestra la ilustración 18.



*Ilustración 18 Experimento que buscaba detectar dicha propagación, para ello intento cambiar la posición del resonador entre L1, L2 y posición 1 inicial, la cual apuntaba a las placas de A y P. (Imagen Propia)*

Entre el 11 de noviembre Hertz, logro configurar sus experimentos, con el fin de mostrar la interferencia, para ello uso un cable y un resonador ortogonal, donde A y P, son placas las cuales están conectadas al cable, cuando A P, apunta hacia adentro la onda es más fuerte a comparación cuando apunta hacia fuera. El objetivo de su

experimento era determinar la velocidad de propagación a través del aire. Lo cual lo hizo, movimiento el resonador a lo largo del cable con el fin de ver el comportamiento de la chispa a lo largo del mismo, encontrando que la

interferencia parece que siguiera la onda del cable, indica que no se propaga la acción directa. Hertz para dividió los tipos de interferencia en tres tipos:

- +, La chispa fue menor con el resonador orientado a L1, es decir hacia AP
- -, Menos interferencia mayor chispa.
- 0, Indica que no hay diferencia entre L1 y L2.

Esto lo hace bajo la suposición de que esto se propaga a una velocidad infinita.

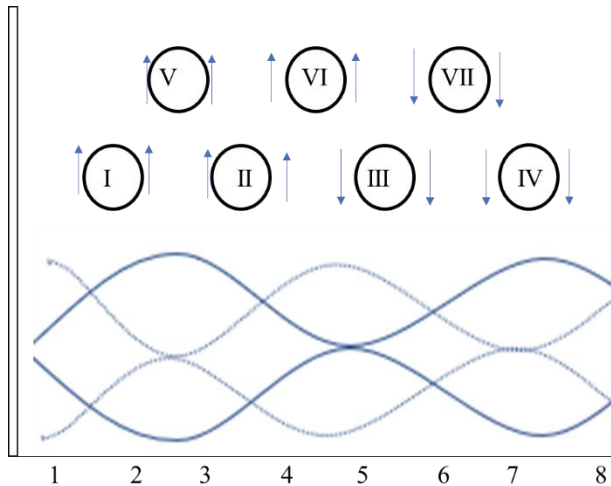
<sup>11</sup>*“Si la acción directa se propaga a una velocidad infinita, entonces cualquier tipo de interferencia (+, 0, -) se encuentra en un punto dado a lo largo del cable debe volver a ocurrir a intervalos regularmente espaciados que miden la longitud de la onda del cable”*. Pág. 273 (Buchwald, 1994).

Ya en estos últimos experimentos Hertz empezó a reflexionar las oscilaciones desde una teoría de campos como la de Maxwell, una que si permitiera analizar dos fuerzas de naturaleza distinta. Para el 8 de diciembre Hertz escribe una carta a su mentor Helmholtz donde le cuenta que habría logrado calcular la velocidad de la onda, la cual decía que era aproximadamente de 200.000 km/seg; esto lo hace a partir de la longitud de onda y una frecuencia calculada a partir del "potencial y capacidad" del oscilador; sin embargo, considero la posibilidad de considerar esa velocidad igual que la de la luz. Aunque había tenía dudas con la constante k, la cual, según Helmholtz, debía ser igual a cero (0), pero para Hertz no era posible y menos después de todo el proceso experimental que ya había realizado esa constante debía tener un valor distinto de 0, es ahí donde inicia la posibilidad de explicarlas a través de otra teoría como la de Maxwell.

Para el 15 de diciembre logra determinar que la fuerza eléctrica se propagaba con una velocidad infinita, y esa fuerza eléctrica podía ser una onda, para demostrar esto sigue usando su ultimo experimento, al cual le añade 150cm más de cable además de poner en un punto fijo Q, el resonador. Se dice que encamino alrededor de 35 experimentos con el fin de dejarlo como herramienta libre de problemas, es decir para que otras personas lo pudieran replicar, además para comprobar que la acción directa no se propagaba como se supuso en un inicio.

---

<sup>11</sup> If the direct action propagates at infinite speed, then whatever type of interference (+, 0, -) is found at a given point along the wire should reoccur at regularly spaced intervals that measure the length of the wire wave.



*Ilustración 19 Comportamiento sinusoidal de la onda debido a la posición del resonador circular. (Imagen Propia)*

Realizo 21 experimentos donde dejaba el resonador fijo y movía el cable y las placas, además de realizar 14 experimentos más donde el cable lo alargaba hacia atrás alterando así la fase de onda del cable, iniciando con un cable de 35cm hasta uno de 9m aproximadamente. Además, en estos últimos 35 experimentos el resonador ya no era circular si no

que lo cambia a rectangular.

Con todos estos cambios y con alrededor de 69 experimentos, logra establecer la longitud de onda, dejando el resonador rectangular fijo, moviendo el cable aumentado, girando este mismo hacia el resonador, la longitud de onda que logra establecer es de, 2,66m aproximadamente.

Usando un dispositivo para demostrar que la acción directa se propaga mucho más rápidamente que la onda de cable si es que esta se propaga, el 22 de diciembre en camina sus investigaciones con el fin de responder este enigma, el cual nace de los avances que este había logrado hasta ese momento, con alrededor de 7 experimentos más, se dio cuenta que con el cable trasero, con una medida de 100 cm de largo, girando así el resonador hacia abajo produciendo así una interferencia desde el punto cero 0 a 3 m, más o menos, esto se daba hacia abajo del cable, lo cual implicaba una nueva interpretación de los signos de interferencia usados anteriormente:

- +, Un aumento de chispa, debido a la desviación del resonador alejándose del cable hacia la placa impulsadora.
- - Una disminución, para la desviación alejada de la placa impulsadora.
- 0, Neutra la propagación no produce nada.

A partir de esto debería haber juicios cualitativos con respecto a la fuerza de las chispas, sin embargo, Hertz en este momento logra concluir que las

interferencias se mantuvieron con el mismo ritmo al igual que con las ondas de cable y por lo tanto esta tuvo una velocidad mucho más alta. Es decir que esa acción directa, no era la velocidad de la luz debía ser distinta.

Sin embargo. Hertz no paro, y siguió tomando medidas, creía que cada vez que él tomaba las medidas éstas cambiaban, él creía que esa “acción” como la llamo él, debía tener una velocidad propagación diferente a la de la onda de alambre. Así que para el 26 de diciembre realizo tres experimentos más, con el cual intentaba distinguir los tres tipos de interferencia, además que logra establecer que esa longitud de onda debía tener una relación con la velocidad, y con la acción directa ya sea de tipo estático o de tipo dinámico. Cabe aclarar que inicialmente él creía que esto se debía solo a una acción directa, sin embargo, los experimentos le fueron mostrando que debía a dos y no a una como creía.

Cuando cambio el resonador de circular a rectangular, logra determinar que el rectangular era mucho más fiable que el circular, además de lograr determinar que la velocidad era finita debido a:

- La acción estática cae en el  $r^2$ , de la distancia
- La acción dinámica cae por la distancia

Además, se dice que cerca de él oscilador predomina la acción estática y la punta lejana predomina la acción dinámica, para establecer esto tenía dos experimentos:

- Uno de ellos el resonador respondía a los dos tipos de acción, pero la chispa era muy débil, esto a distancias grandes.
- El segundo, el resonador estaba dominado por la dinámica y producía chispas fuertes, sin embargo, fue inútil.

Por esto Hertz decide combinar estos dos experimentos, con lo cual logra definir el oscilador como un dipolo. Uno de los objetivos del artículo de: “*Sobre la acción de una oscilación eléctrica rectilínea en un circuito vecino*”, la idea era explicar cómo podrían confiar en su aparato además de explicar detalladamente como estaba construido, con el fin de poder ser replicado, además de realizar una ruta de propagación de las mismas. Con lo cual logra concluir que:

*“<sup>12</sup>Probablemente tengamos ante nosotros aquí la primera indicación de una tasa finita de propagación de acciones eléctricas”, Pág. 300 (Buchwald, 1994).*

Para 1887, intento construir un artefacto con el cual buscaba demostrar que la fuerza eléctrica se propaga y así responder de una vez por todas, todas las preguntas de la academia de Berlín. Es así como intenta demostrar ondas por primera vez, sin embargo, a Hertz le preocupaba más como efecto de propagación que como acción ondulatoria. La primera vez que Hertz logra observar las ondas las describió como sombras, aunque era consciente de que esa propagación posiblemente podía viajar como onda, pero jamás pensó que sería una.

Cuando Hertz logra ver por primera vez ondas, las describió como sombras, en las paredes de la habitación en la que se encontraba, aunque podía ser el reflejo de la fuerza de acción, en ese momento no era posible para Hertz a pesar de conocer la teoría de Maxwell.

Para el 2 de marzo de 1888, intento reflejar las ondas electromagnéticas, para ello uso una placa de Zinc, ahora era más claro lo que había descrito anteriormente como sombras, también uso un espejo cóncavo muy grande, con el cual no tuvo ningún resultado, pues el espejo resultaba muy pequeño para poder reflejar una longitud de onda tan grande, estos experimentos de las ondas tenían que ver con una fuerza de propagación, sin embargo, los experimentos de las ondas de alambre en consecuencia no podían funcionar para las ondas de aire, por esta razón Hertz decide realizar un mapeo del comportamiento que tuvo la onda a lo largo de una distancia donde el resonador estaba alejado estaba casi que en una esquina.

Hertz repite el experimento con un resonador circular a la mitad del diámetro quería ver el comportamiento. Sin embargo, Hertz, le preocupaba que todas las teorías caían en un problema con esto que había encontrado Hertz, aunque era un efecto desconocido, Hertz era consciente de que esto podía alterar las teorías electrodinámicas existentes como lo dijo en uno de sus manuscritos:

---

<sup>12</sup> we probably have before us here the first indication of a finite rate of propagation of electrical actions.  
Traducción del inglés al español, realizado por el autor del trabajo.

<sup>13</sup>Me parece que el punto más importante ahora es la certeza de que la propagación a través de cables conductores es perceptiblemente más lenta que en el aire, mientras que todas las teorías anteriores, incluida la de Maxwell, llevaron a la conclusión de que la propagación en los cables se producía con la velocidad de la luz. (H. Hertz 1977, pág. 255). Citado por (Buchwald, 1994) Es así como decide trabajar y estudiar a fondo la teoría de Maxwell, y lo que este decía sobre las ondas, dentro del artículo "*Las fuerzas de las oscilaciones eléctricas tratadas de acuerdo con la teoría de Maxwell*" de Hertz, fue influyente además constituyente de la base de la teoría de campos, sin embargo, esta teoría no podía explicar eso de los dipolos de Hertz. Pues el dipolo era lo que producía el campo electromagnético, Para probar eso el recurrió a probar ese potencial que se da, a lo que recurrió a sus métodos de designar un potencial apropiado para proporcionar una solución, a ese potencial lo llamo U para satisfacer la ecuación de onda. Los campos  $\vec{B}$  y  $\vec{E}$ , se definieron en términos de U.

Recordemos que, para Maxwell, estas ondas son puramente transversales que se mueven paralelamente al cable, las ondas longitudinales no eran posibles para Maxwell, sin embargo, Hertz tenía dudas, y por esto decide demostrar su existencia experimentalmente y teóricamente, para él era dudosa la polarización infinita del éter, para fuerzas que se alternan rápidamente. Hertz dentro de sus experimentos había logrado ralentizar las ondas de cables y lo hizo, volviendo los cables en espiral, efecto que tampoco explicaba la teoría de Maxwell, sin embargo, él era consciente que esta era la teoría más completa, puesto que sabía que las ecuaciones de Helmholtz no eran correctas ya que no se podía considerar el éter infinitamente polarizable.

### 3. EJE DE LA EJEMPLIFICACIÓN

Aunque para Hertz, esto no iba a significar mucho dentro de la comunidad científica si lo iba a ser, sus aportaciones iban a lograr grandes avances y

---

<sup>13</sup> It seems to me that the most important point is now the certainty that propagation through conducting wires is perceptibly slower than in air, whereas all previous theories, including Maxwell's, led to the conclusion that propagation in wires took place with the velocity of light. (J. Hertz 1977, p. 255)

desarrollos revolucionarios, como la telegrafía, incluso el desarrollo de la radio terrestre, pero también la radio del mar, en especial la información meteorológica actualizada, permitiendo así predicciones del mal tiempo, ubicación y demás en el mar.

Se dice que, en 1896, casi diez años después, de sus descubrimientos empezaron a darse investigaciones frente el cómo poder encontrar señales cósmicas u ondas de radio extraterrestre, para ello, realizaron una serie de experimentos de altas escalas, para 1930, se descubren las primeras señales de la vía láctea y el sol, para ello se usó un plato parabólico bastante grande, se dice que Wurzburg-Riese, fue quien comenzó la radioastronomía. Mientras el señor Becker Friedrich comienza en 1952 la planificación de un dispositivo radiotelescopio, solo para el año 2000 se conocería el radiotelescopio más grande del mundo.

Las ondas electromagnéticas han permitido la detección de señales acústicas cósmicas, pues mediante la radiodifusión, se permite la modulación de ondas de radio, que se usan para transmitir música y hablar, naturalmente se da la radiación electromagnética, permitiendo así escuchar las señales acústicas, pero además se pueden observar la radiación electromagnética, estas son detectables mediante la variación del brillo de las estrellas, es algo muy parecido al cómo se detectan los terremotos. De esta manera se pueden realizar estudios sísmicos de la estructura interna de los cuerpos celestes. <sup>14</sup> *Estas fuentes de audio estelar se pueden tratar como instrumentos musicales virtuales dando un nuevo sentido a la música de las esferas".* (Wiederkehr, 2007)

Estas ondas también han tenido aportes significativos dentro del campo de la medicina, donde se han logrado grandes avances, pues gracias al conocimiento que se tiene de las ondas electromagnéticas se han avanzado en la construcción de maquinaria para la detección de enfermedades no tan visibles para el ojo humano como también lo han hecho para los mismos tratamientos. No se desconoce que estas tienen efectos adversos, para la salud al tener un acercamiento a ellas irracional o inconsciente.

---

<sup>14</sup> *“Diese herausragenden Audioquellen können als virtuelle Musikinstrumente behandelt werden, die der Musik der Sphären eine neue Bedeutung verleihen.”* Traducida del alemán al español por el autor.

Resaltando un antes, un durante y un después de las ondas electromagnéticas, se logra evidenciar algunas de las problemáticas que surgieron en la construcción y constitución de lo que es la onda electromagnética, sin embargo, es importante hacer claridad frente a los aspectos que podrían ser relevantes dentro de la enseñanza de estas, por esta razón se hará una reflexión, y análisis en el siguiente capítulo, entorno a la enseñanza de las ondas electromagnéticas.

## CAPITULO 4 REFLEXIONES GENERALES

### REFLEXIÓN FRENTE AL DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

*“Al plantear esos experimentos y al describirlos, dejamos de pensar eléctricamente, pensamos ópticamente. Ya no vemos corrientes circulando por los conductores, o electricidades acumulándose. Vemos únicamente las ondas en el aire como se entrecruzan, como se dividen, se reúnen, se refuerzan y debilitan”* (Doncel & Roque, 1990).

Es importante ver la gran trascendencia que tuvieron estos experimentos, además de todo el análisis teórico e incluso matemático, que se tuvieron en cuenta para la constitución de estas, además de las problemáticas a las que se enfrentó y tuvo que dar respuesta Hertz, que aunque en un inicio todo el trabajo fue experimental, sabía que este debía estar enmarcado y explicado por alguna de las teorías existentes en ese momento, esto nos permite decir que el trabajo de Hertz, no fue solo demostrar la existencia de las ondas, como se suele pensar, si no que fue todo un análisis de los diferentes aspectos como teóricos, conceptuales e experimentales, lo que inicio por curiosidad y juego termino en un gran trabajo experimental, el cual la humanidad no podrá pasar por alto pues se le deben grandes avances desde la medicina como la comunicación entre otros. Así como él dice en su texto *“Al menos a mí, me han parecido estos experimentos enormemente apropiados para apartar toda duda sobre la identidad de la luz, el calor radiante y del movimiento ondulatorio electrodinámico”* (Doncel & Roque, 1990). Donde las ondas electromagnéticas eran clasificables ya no hablábamos de un solo tipo si no que se hablan de diferentes formas de ondas electromagnéticas.

Aunque no es claro para Hertz que eran las ondas electromagnéticas, es posible intuir que estas son como rayos dadas en un campo, así como las describió el: *“... esas ondas constituyen un “rayo de fuerza eléctrica” es decir de campo eléctrico”* pág. 18 (Doncel & Roque, 1990).

Dicha fuerza, tenía propiedades de: propagación rectilínea, reflexión, refracción, y polarización, propiedades propias de las ondas, esto debido al comportamiento

de la chispa bajo las diferentes modificaciones a las que sometió a la chispa, permitiendo decir que estas no se deben solo a las cargas del oscilador, sino que es toda una modificación propia del espacio.

Por otro lado, la evolución conceptual a la que estuvo expuesto Hertz, estos nuevos fenómenos no encajaban dentro de algunas teorías, pues era de pasar de una electrodinámica como la de Weber, Helmholtz a la de Maxwell y Faraday, en otras palabras, eran dos perspectivas diferentes que pusieron lo en conflicto, pero a la vez en evolución a Hertz, quedándose finalmente con la perspectiva de campos de Maxwell y Faraday; quienes consideraban que los fenómenos eléctricos y magnéticos se dan en todo el espacio incluso el vacío.

Algunas de las evoluciones conceptuales, se dio luego de trabajar con los dieléctricos con el cual logar demostrar que: “...en los cuerpos dieléctricos corrientes de “polarización” (Maxwell le llamo desplazamiento) que ejercen acciones análogas a las de los conductores, en concreto inducen corrientes en conductores próximos”. (Doncel & Roque, 1990). Otra evolución conceptual fue el hecho de ver el espacio como un dieléctrico, el cual era capaz de ser polarizable, al detectar una acción eléctrica inductora esta venía a una velocidad finita, la cual intento calcular Hertz, además de atribuirle características ondulatorias a la fuerza eléctrica. Asimismo, demostró que la hipótesis de qué onda transversal de la luz, eran ondas electrodinámicas, pero también lo hizo con la hipótesis de Faraday quien aseguraba que la fuerza eléctrica era polarizable, y que dichas fuerzas subsisten por sí mismas en el espacio. Por otro lado, Hertz realizo el cálculo de las ecuaciones de Maxwell desde un formalismo poco usual en la época. el vectorial, que es conocido como el vector de Hertz, todo lo hace a partir de un dipolo, con lo que logra demostrar que: “Las ondas hercianas se propagan esféricamente y no ondulatoriamente como había dibujado” (Doncel & Roque, 1990)

El dipolo de Hertz: “...está formado por dos cargas eléctricas opuestas que oscilan armónicamente con cierta frecuencia a lo largo de un segmento, estando siempre simétricamente situadas respecto al centro” (Garzón Barragán & Múnera , 2004), a partir del comportamiento de este, Hertz decide calcular las

ecuaciones de Maxwell y consigue la onda electromagnética, demostrando así su existencia no solo teóricamente y experimentalmente sino que también matemáticamente.

## MAPEO CARTOGRÁFICO DE LA ONDA ELECTROMAGNÉTICA

Luego del desarrollo de la investigación, el análisis, y la reflexión, es importante para la investigación dejar plasmada, por medio de la cartografía, la construcción conceptual que se hizo de la onda electromagnética, a partir de iconos, imágenes, frases y demás que permitan mostrar esos aspectos que se consideraron importantes, lo cual permite tener una visión amplia de lo que implica hablar de ellas, permite definir los criterios y aspectos a tener en cuenta en la enseñanza, ya que aunque es un tema amplio por el gran peso teórico, matemático y experimental que implica, con dichos criterios y aspectos será más sencillo su enseñanza.

La cartografía quedó dividida en los cinco aspectos que se consideraron importantes, para poder abarcar la enseñanza de las ondas electromagnéticas, las cuales son:

**Histórico:** Aspecto que se tiene en cuenta con el fin de situar el concepto dentro de una teoría que traía una trayectoria, debido a los paradigmas de la época. Se traen a colación algunos físicos de la época para poner en contexto que se habría hecho y dicho antes del descubrimiento de las ondas electromagnéticas.

**Teórico:** Aspecto que tiene como objetivo, desarrollar algunos de los conceptos, además de poner en contexto algunos de los indicios teóricos que daban luz de la existencia de la onda electromagnética, sin dejar de lado otras implicaciones teóricas como lo que implica que sea una teoría de campos.

**Conceptual:** Aspecto el cual muestra el avance que tuvo Hertz con algunos conceptos, ya que a medida que avanzaba experimentalmente le fue necesario replantearlos o crearlos para poder darle sentido teórico a las ondas electromagnéticas.

**Matemático:** Aspecto que permite visualizar la demostración matemática de las ondas electromagnéticas a partir de las ecuaciones de Maxwell, teniendo presente algunas consideraciones, además de poner de presente que Hertz hayo

matemáticamente las ondas electromagnéticas vectorialmente con ayuda de un dipolo.

**Experimental:** Aspecto el cual nos permitirá ver el avance experimental realizado por Hertz con algunos de los experimentos más relevantes de la investigación, esto con el fin de poder mostrar ese experimento final no como resultado, sino más bien como la suma de modificaciones e implicaciones objetivas en cada una de ellas. Observar la ilustración 20.

Por otro lado para el desarrollo de la cartografía en 3D, se hace mediante una caja sorpresa, la cual tiene en su interior tres cajas cada una de ellas contiene uno de los aspectos que se nombraron anteriormente y además se desarrolla uno a uno, se muestra de esta manera con el fin de hacer una analogía de lo que es una cartografía por separado funciona cada uno de sus aspectos, ejemplo puedo hablar de estas ondas desde lo matemático solo usando un par de ecuaciones y algunas consideraciones puede llegar a ellas, también puedo hablar de ellas desde lo teórico sin usar nada matemático, debe existir y haber un anclaje entre lo matemático, teórico, conceptual y experimental, son uno a favor de la onda electromagnética y no son más que anécdotas cuando se ven y se trabajan por separado.

La onda electromagnética de por si es un fenómeno que no se da espontáneamente, lo cual complica un poco establecer esas bases sólidas, para construir una idea clara y concisa de lo que es, además de resaltar las implicaciones que existen al estar descritas bajo una teoría de campos.

**NOTA:** *La cartografía fue realizada en físico, por esto en el anexo 1, se encontrará las fotografías de la cartografía además se deja un stop motion mostrando la cartografía.*

*<https://youtu.be/3m1O1nN8GZI>*

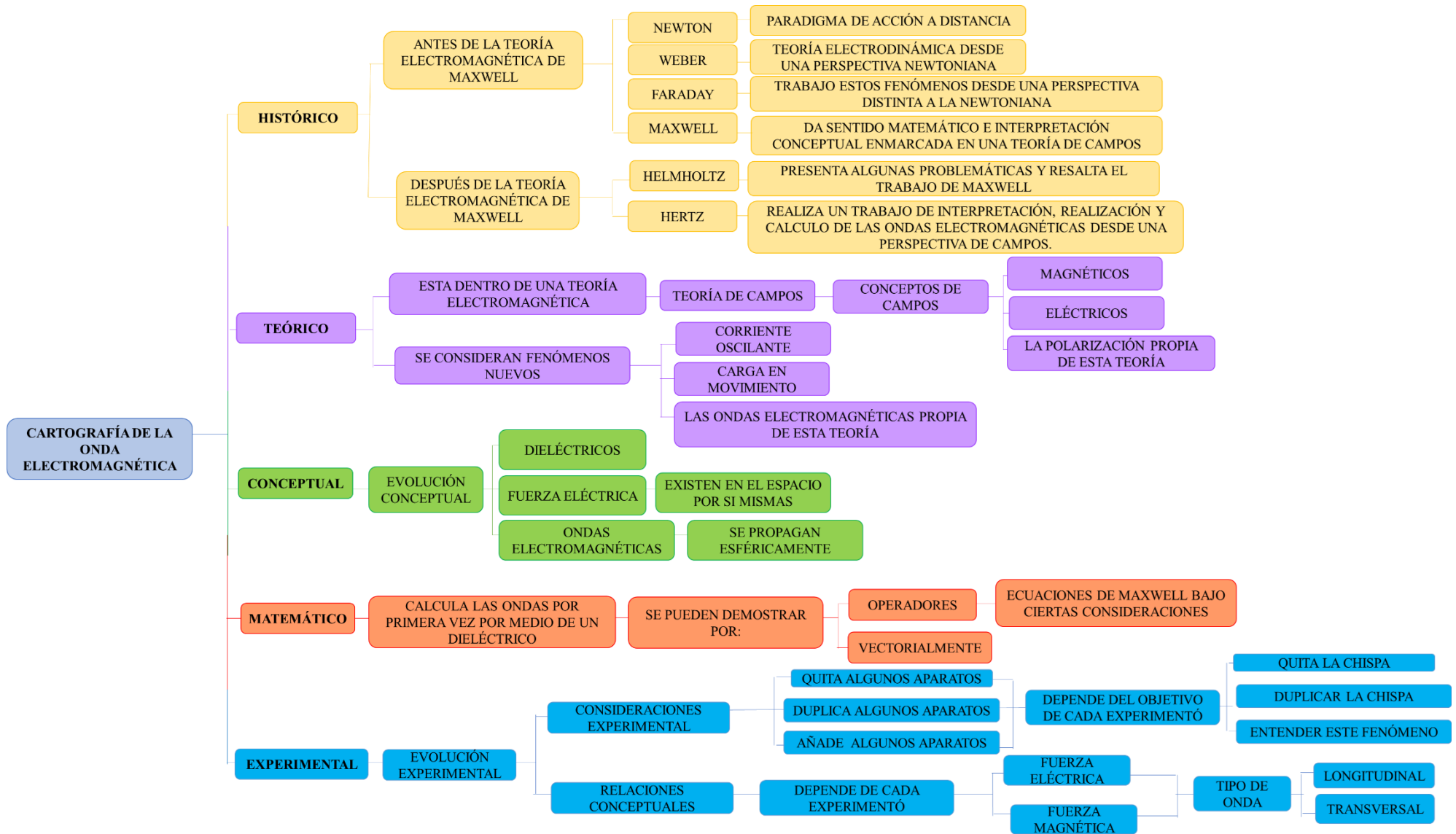


Ilustración 20 Diagrama sinóptico de la cartografía conceptual construida, por aspecto. (Histórico, Teórico, Conceptual, Matemático y Experimental) (Imagen Propia)

## CAPITULO 5 CONCLUSIONES

### CONCLUSIONES

- Se abordó la cartografía conceptual como metodología de investigación, además se desarrolla la importancia de esta en los procesos de enseñanza de la física, debido a la variedad de aplicaciones que esta puede tener en este campo como en otros; es importante en la medida que este tipo de metodologías no son muy usuales dentro de la enseñanza.
- La construcción conceptual, es algo complejo, debido a que es importante tener de presente aspectos como: históricos, teóricos, experimentales, conceptuales y matemáticos, ya que el desarrollo de este, se dio dentro de un contexto permeado, ciertas características culturales, que deben ser tenidas en cuenta a la hora de su enseñanza, ya que es un fenómeno que no se da espontáneamente, por esto es importante tener presente estos aspectos para ilustrar una imagen, de lo que es una onda electromagnética, sus implicaciones y consideraciones.
- No es una guía de lo que hay o no que hacer, es una forma de ilustrar la enseñanza de un tema que en muchas ocasiones no es abordado y ni siquiera enunciado en la enseñanza del electromagnetismo, por esto se muestra como una integración de diversos elementos que pueden ser enseñadas por separado pero que a la larga hacen parte de un todo en este caso la onda electromagnética de la teoría electromagnética de campos.
- Parte de la ilustración incide en crear imágenes de lo que es la onda electromagnética, desde la recontextualización la cual es una estrategia sistemática de conocimiento, donde se da un trabajo de interpretación de esos conceptos y teorías científicas en relación con algún problema de enseñanza, por esto se da la construcción del mapeo de la onda electromagnética, donde es separado por aspectos, pero que cada uno de esos aspectos es una parte de algo más grande como lo es el concepto de onda electromagnética.

## BIBLIOGRAFÍA

Alfonso Romero, a. (2012). Propuesta fenomenológica para la enseñanza de las ondas electromagnéticas basado en los trabajos de Heinrich Hertz. Bogotá: Universidad Pedagógica Nacional.

Ayala Manrique, M., Malagón Sánchez, J., Romero Chacón, A., Rodríguez, & Garzón Barrios, M. (2008). *Los procesos de formalización y el papel de la experiencia en la construcción del conocimiento sobre los fenómenos físicos*. Bogotá: Universidad Pedagógica Nacional.

Ayala Manrique, M. (1992). *La enseñanza de la física para la formación de profesores de física*. porto gramado, Brasil: Universidad Pedagógica Nacional.

Ayala Manrique, M. (2006). Los análisis histórico-críticos y la recontextualización de saberes científicos. construyendo un nuevo espacio de posibilidades. 16.

Barragán Giraldo, D. F., & Amador Báquiro, J. C. (25 de 10 de 2014). La cartografía social-pedagógica una oportunidad para producir conocimiento y re-pensar la educación. La cartografía social-pedagógica una oportunidad para producir conocimiento y re-pensar la educación. Bogotá, distrito capital, Colombia: Itenario educativo.

Barragán Giraldo D.F (segundo semestre 2016) Cartografía social y pedagógica entre teoría y matemática) Bogotá, distrito capital, Colombia: revista colombiana de educación, n° 70. Primer semestre de 2016, Bogotá, Colombia.

Berkson, w. (1985). Las teorías de los campos de fuerza desde Faraday hasta Einstein. Madrid: Alianza editorial.

Beléndez, A. (2008). La unificación de luz, electricidad y magnetismo: la "síntesis electromagnética" de Maxwell. *Revista Brasileira de Ensino de Física* , 30.

Bryant , J., Giora , H., & Doncel , M. (1998). Experimentos y experimentos de Heinrich Hertz Aparato: su descubrimiento de las ondas de radio y su delineación de sus propiedades. En D. Baird, R. Hughes, & A. Normann,

*Heinrich Hertz classical physicist, modern philosopher* (págs. 39-73). Columbia: Springer. Science + Business Media BV.

Buchwald, J. (1994). *The creation of scientific effects: Heinrich Hertz and Electric Waves*. Chicago: Universidad de Chicago.

Castillo Ayala, J. (2008). La historia de las ciencias y la formación de maestros: la recontextualización de saberes como herramienta para la enseñanza de las ciencias. *Nodos y nudos*, 73-80.

Catillo, A. J. (2013). Ideas de tiempo con estudiantes de ciencias de comunidades culturalmente diferenciados. Revisión de Antecedentes. *Revista internacional Magisterio de Educación y pedagogía. (La pedagogía en la comunicación transmediática)*, 82-84.

Castillo Ayala, J. (2004). De los fenómenos Mecánicos al Mecanicismo. *Universidad Pedagógica Nacional*, 1- 68.

Cohen, B. (1983). La revolución científica de Newton y a revolución científica y la revolución newtoniana como conceptos históricos. En B. Cohen, *La revolución newtoniana y la transformación de las ideas científicas* (págs. 21-70). Madrid España : Alianza Editorial S.A.

Diaz Angel , S. (2009). Aportes de Brian Harley a la nueva historia de la cartografía y escenario actual del campo en Colombia America Latina y el mundo . *Historia critica N° 39 Septiembre* , 180-200.

Dipak I. Sengupta, T. K. (2003). Maxwell, Hertz, the Maxwellians, and the early history of electromagnetic waves. *Antennas and propagation magazine*, 13-19.

Doncel, M., & Roque, X. (1990). *Las ondas electromagnéticas de Heinrich Hertz*. Barcelona: Universidad de Barcelona.

Freire, P. (1970). *Pedagogía del Oprimido*. México.

Gamez, J. S. (2007). Hertz (1857-1894) y las ondas Hertzianas. *100Cias@Uned*, 91-100.

Garzón Barragán , I., & Múnera , H. (2004). Metodo de Hertz para solucionar las ecuaciones de Maxwell: El caso del dipolo oscilante. *Momento* , 30-42.

Guattari, F., & Rolnik, s. (2005). *Micro política Cartografías del Deseo*. España: Traficante de sueños.

Guattari, F. (2013). *Líneas de fuga por otro mundo de posibles*. Buenos Aires: Cactus.

Guattari, F., & Deleuze, G. (1980). *Rizoma*. En F. Guattari, & G. Deleuze, *Mil mesetas capitalismo y esquizofrenia* (pág. 522).

Habegger, s., & Mancila, L. (2018). Una propuesta alternativa de investigación socio pedagógica. Universidad de Málaga, 106-113.

Habegger, s., Mancila, L., & Serrano, E. (2006). El poder de la cartografía del territorio en las prácticas contra hegemónicas. Universidad de Málaga España, 1-10.

Faccio, D., Tambuchi, D., & Clerici, M. (2004). A revision of the 1888 Hertz experiment. University of insubria, 1-3.

Feedman, R., & Leighton, R. (1998). *Feedman física vol 2 Electromagnetismo y Materia*. Feedman física vol. 2 Electromagnetismo y materia (pág. cap. 18 al cap. 21). México: Pearson Educación.

Gamabau J, C. (14 de 08 de 2019). *Foro histórico de las telecomunicaciones*. obtenido de foro histórico de las telecomunicaciones: <http://forohistorico.coit.es/index.php/sendas/tecnologica-mundial/item/los-experi-mentos-de-hertz>

Gamez, J. S. (Madrid). Hertz (1857-1894) y las ondas hertzianas. *100cias@uned*, 91-100.

Garavito, M. D. (2019). Evaluación de las competencias con apoyo en estrategias para la gestión del conocimiento. *Centro Universitario CIFE*.

García Arteaga, E. (2009). Capítulo 1 Historia y enseñanza de las ciencias;(perspectivas socioculturales) y Capítulo 2 enseñanza de las ciencias y recontextualización del conocimiento científico. en E. G. García Arteaga, (págs. 19-52). Cauca: Universidad Valle del Cauca.

Garcia Doncel, M. (1998). On Hertz's conceptual conversion: from wire waves to air waves. *Kluwer academic publishers*, 73-87.

García Doncel, M., & Roque, X. (1990). *Heinrich Hertz, las ondas electromagnéticas*. Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya.

Giancoli, D. C. (2008). *Física para las ciencias y ingeniería (4a. ed.)*. Mexico: Pearson education. Hertz, H. (1983). *Electric waves*. London-New York: Dover publication.

Jackson, J. (1998). *Classical Electrodynamics*. Estados Unidos de América: Universidad de California Berkeley. Lamberti, P. (1997). Las investigaciones de Heinrich Hertz sobre las ondas electromagnéticas. *revista enseñanza de la física*, 37-47.

Malagón Sánchez, J., Ayala Manrique, M., & Sandoval Osorio, S. (2013). Construcción de fenomenologías y procesos de formalización un sentido para la enseñanza de las ciencias. Bogotá: Universidad Pedagógica Nacional.

Martin, J., Nicotra, M., Leguizamón, C., & Galeasso, A. (2016). Propuesta de recreación de los experimentos de Hertz en el laboratorio de la enseñanza de la física. *revista facultad de ciencias exactas, físicas y naturales*, vol. 3, no. 2, 147-150.

Moreno Vargas, P., & Gonzales Flórez, J. (2017). El experimento de la resonancia electromagnética de Hertz dentro de una propuesta de un curso de electromagnetismo. *Tecné, Episteme y Didaxis: TED*, (6), <https://doi.org/10.17227/ted.num6-5674>.

Moreno Vargas, P. (2001). El oscilador de Hertz. *Tesis de Maestría*. Bogotá: Universidad Pedagógica Nacional.

Mosca, T. (2005). *Física para la Ciencia y la Tecnología (Movimiento)*. Editorial Reverté.

Nordmann, D. B. (1998). *Heinrich Hertz: Classical physicist, modern philosopher*. Boston: Advisory Board.

Oberli, C. (2006). *Ondas de radio antenas y salud: Nociones fundamentales para el legislador*. Chile: Subsecretaria de telecomunicaciones, Ministerio de transportes y telecomunicaciones.

Orozco Cruz, J.C (11 de mayo de 2017). *Researchgate*. obtenido de researchgate:

[https://www.researchgate.net/publication/323591927\\_consideraciones\\_para\\_un\\_enfoque\\_historico-epistemologico\\_de\\_la\\_ensenanza\\_de\\_las\\_ciencias\\_alrededor\\_de\\_la\\_existencia\\_de\\_onda\\_electromagnetica](https://www.researchgate.net/publication/323591927_consideraciones_para_un_enfoque_historico-epistemologico_de_la_ensenanza_de_las_ciencias_alrededor_de_la_existencia_de_onda_electromagnetica). Bogotá, Colombia: Universidad Pedagógica Nacional.

Perea, M., & Buteler, L. (2016). El uso de la historia de las ciencias en la enseñanza de la física: una aplicación para el electromagnetismo. *Góndola, ens aprend cienc.*12-25.

Pereira Okada, A. (2006). Cartografia Investigativa INTERFACES Epistemológicas Comunicacionais para mapear CONHECIMENTO em Projetos de PESQUISA. *Cartografia Investigativa INTERFACES Epistemológicas Comunicacionais para mapear CONHECIMENTO em Projetos de PESQUISA*. São paulo, Brasil: Universidad Católica de São paulo.

Rutgers. (s.f.). *Recurso tecnológico para la enseñanza de la física*. Obtenido de Recurso tecnológico para la enseñanza de la física: <https://www.islephysics.net/pt3/experiment.php?topicid=2&exptid=14>

Rodríguez Ortiz, E. (21 de 02 de 2017). Propuesta de aula desde el experimento de Heinrich Hertz para la construcción de las ideas alrededor de la existencia de onda electromagnética. Bogotá, Universidad Pedagógica Nacional

Rodríguez-Peralta, M.L. (2020). La cartografía conceptual socioformativa y la investigación cualitativa. En Análisis y reflexiones en torno a la metodología de la investigación y el desarrollo humano. CIFE-México

Romero Alfonso, A. (2012). Propuesta fenomenológica para la enseñanza de las ondas electromagnéticas basado en los trabajos de Heinrich Hertz. Bogotá, Universidad Pedagógica Nacional

Sears, Z. Y. (1999). Ondas electromagnéticas. en Z. y. Sears, *Física universitaria* (págs. 1092-1115). México: Pearson education México.

Segura López, A. (2015). El concepto de onda electromagnética y su medio de propagación a partir de la teoría de maxwell y los trabajos de Hertz. Bogotá, Universidad Pedagógica Nacional

Serway, R. &. (2009). Ondas electromagnéticas. en R. &. Serway, *Física para ciencias y ingeniería con física moderna* (págs. 952-966). Mexico: Cengage.

Smirnov-Rueda, R. (2005). On essential incompleteness of Hertz's experiments on propagation of electromagnetic interaction. *fundamentals of physic*, 1-31.

Tipler, P. (2010). Ecuaciones de Maxwell y Ondas electromagnéticas. en P. A. Tipler, *física para la ciencia y la tecnología vol. 2 (electromagnetismo y electricidad)* (págs. 1029-1054). Mexico: editorial Reverte.

Smirnov - Rueda, R. (2005). On Essential incompleteness of Hertz's experiments on propagation of electromagnetic interaction. *Fundamentals of physis*, 1-31.

Tobón, S. (2004). Estrategia didáctica para formar competencias (Modulo V) La cartografía Conceptual. *Ciber Educa*, 1-30.

Tobón, S. (25 de noviembre de 2013). Cartografía Conceptual: Estrategia para la formación y evaluación de conceptos y teorías (2012). Obtenido de isuu: [https://issuu.com/cife/docs/e-book\\_\\_cartograf\\_\\_a\\_coceptual](https://issuu.com/cife/docs/e-book__cartograf__a_coceptual).

Wiederkehr, K. (18-12 de 10 de 2007). Heinrich Hertz (1857-1894) and the Development of Communication. Booklet of Abstracts of the international scientific symposium. Hamburg: Institute for the History of Science. *Heinrich Hertz between old electrodynamics and Maxwell's Theory Pag (31-32)*. Hamburgo, Hamburgo , Alemania: Instituto de Historia de la Ciencia.

Zambrano Chagüendo, A. (2004). Cuestiones históricas y epistemológicas en torno a la enseñanza de las ciencias. *Icfes*.

Zamudio, G. B. (s.f.). La formación en algunos apartados de la Didáctica magna. *Universidad Pedagogica Nacional- Borrador* .

ANEXOS  
ANEXO 1 (FOTOGRAFÍAS DE LA CARTOGRAFÍA EN FÍSICO).



Ilustración 21 Cartografía en físico, la cual muestra la caja, la cual en su interior contiene cada uno de los aspectos de esta teoría, aspectos desarrollados dentro de ella



Ilustración 22 Primer aspecto, Histórico



Ilustración 23 Segundo aspecto, Teórico Imagen Propia



Ilustración 24 Tercer aspecto el conceptual, y cuarto aspecto Matemático imagen propia



Ilustración 25 Quinto aspecto, el experimental. (La luz es el bombillo encendido, luego de una descarga de un encendedor de cocina).

**ANEXO 2:**  
**DEMOSTRACION MATEMATICA DE LAS ONDAS**  
**ELECTROMAGENTICAS APARTIR DE LAS ECUACIONES DE**  
**MAXWEL**

Ecuaciones de Maxwell son:

$$\nabla \times E = \frac{\rho}{t}$$

Ley de Gauss

$$\nabla \times B = 0$$

Ley de Gauss para el campo

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$$

Ley de Faraday

$$\nabla \times B = \mu J + \mu \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t}$$

Ley de Ampere

Enumeraremos las ecuaciones de Maxwell:

$$\nabla \times E = \frac{\rho}{t} \quad (1)$$

$$\nabla \times B = 0 \quad (2)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (3)$$

$$\nabla \times B = \mu J + \mu \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} \quad (4)$$

Podemos decir que las densidades tanto de la corriente electrica como la densidad de carga libre es igual a 0 quedando como:

$$\nabla X E = 0 \quad (1)$$

$$\nabla X B = 0 \quad (2) \quad (3)$$

$$\nabla X E = -\frac{\partial B}{\partial t}$$

$$\nabla X B = \mu \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} \quad (4)$$

Podemos multiplicar a los dos lados del igual un rotacional en la ecuacion 3 y 4.

$$(\nabla X) \nabla X E = \nabla X \left( -\frac{\partial B}{\partial t} \right) \quad (3)$$

$$(\nabla X) \nabla X B = \nabla X \left( \mu \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} \right) \quad (4)$$

Opero y orgaizo las ecuaciones:

$$(\nabla X) \nabla X E = \nabla X B \left( -\frac{\partial}{\partial t} \right) \quad (3)$$

$$(\nabla X) \nabla X B = \nabla X E \left( \mu \varepsilon \frac{\partial}{\partial t} \right) \quad (4)$$

Reemplazo el  $\nabla X E$  y  $\nabla X B$  quedando como:

$$(\nabla X) \nabla X E = -\frac{\partial}{\partial t} \left( \mu \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} \right)$$

$$(\nabla X)\nabla XB = \mu\varepsilon \frac{\partial}{\partial t} \left( -\frac{\partial B}{\partial t} \right)$$

Hago uso de la propiedad de:

$$\nabla X(\nabla XE) = \nabla(\nabla XE) - \nabla^2 E$$

$$\nabla X(\nabla XB) = \nabla(\nabla XB) - \nabla^2 B$$

Quedando como:

$$(\nabla X)\nabla XE = \mu\varepsilon - \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}$$

$$(\nabla X)\nabla XB = \mu\varepsilon - \frac{\partial^2 B}{\partial t^2}$$

La opero nuevamente:

$$\nabla(\nabla XE) - \nabla^2 E = \mu\varepsilon - \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}$$

$$\nabla(\nabla XB) - \nabla^2 B = \mu\varepsilon - \frac{\partial^2 B}{\partial t^2}$$

Ahora podemos reemplazar en la ecuacion 1 y 2 quedando la ecuacion como:

$$0 - \nabla^2 E = \mu\varepsilon - \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}$$

$$0 - \nabla^2 B = \mu\varepsilon - \frac{\partial^2 B}{\partial t^2}$$

Organizao la ecuacion a un solo del igual quedando como:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} - \frac{1}{\mu\varepsilon} \nabla^2 E = 0$$

$$\frac{\partial^2 B}{\partial t^2} - \frac{1}{\mu\epsilon} \nabla^2 B = 0$$

Donde se puede decir que:

$$\frac{1}{\mu\epsilon} = c^2$$

Reemplazo quedando asi como:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} - c^2 \nabla^2 E = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2 B}{\partial t^2} - c^2 \nabla^2 B = 0 \quad (6)$$

Son las ecuaciones de las ondas electromagneticas.

# ANEXO 3

## PROPUESTA PEDAGÓGICA ENTORNO A LA CARTOGRAFÍA CONCEPTUAL



UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA  
NACIONAL

*Educadora de educadores*

La propuesta pedagógica, está dirigida a estudiantes universitarios, quienes se supone que deben ver y conocer este tipo de temáticas dentro del currículo, se presenta como propuesta, ya que en ningún momento fue implementada, sin embargo fue importante dejarla para ilustrar la idea de cómo usar la metodología de la cartografía para la enseñanza de la onda electromagnética, aunque está diseñada para cinco secciones estas pueden estar inmersas en la misma clase, o en días diferentes esto se debe concretar a la conveniencia e exigencias propias de cada plantel.

¿Qué quiero que aprendan?

EL concepto de onda electromagnética, a partir de la construcción de una cartografía conceptual.

- Conceptos e Ideas Fundamentales.

Campo electromagnético, fuerza magnética y eléctrica, dipolo, electromagnetismo, onda, cartografía.

- Habilidades y destrezas.

Realizar predicciones e inferencias a partir de la identificación de conocimiento teórico y empírico necesario para responder a las preguntas sobre la onda electromagnética.

- Actitudes o visiones del mundo.

Podemos predecir la existencia de la onda electromagnética, a partir de la construcción de cada uno de los aspectos que la constituyen, de esta manera la podremos relacionar con la vida diaria y entender situaciones de su diario vivir.

¿En qué sesiones se divide?

Se divide en cinco sesiones y repartidas como de contextualización, y conceptualización, es importante que el estudiante comprenda el concepto, y las relaciones directas que hay entre cada uno de los aspectos, ya que dichos aspectos serán abordados a partir de situaciones de la vida cotidiana con el fin de que el estudiante se familiarice.

La secuencia de actividades en cada sesión.

Las sesiones se han estructurado de la siguiente manera:

**Sesión I:** ¿Qué es una cartografía?, ¿Qué es la teoría del electromagnetismo?

**Propósito:** Hacer una explicación clara y concisa de lo que es una cartografía con el fin de ir construyendo ideas de cómo se puede realizar una, esto con el fin de que el estudiante cuente con las herramientas necesarias para construir su propia cartografía de la onda.

Además, conocer que conciben como onda electromagnética, si reconocen las implicaciones teóricas, conceptuales e incluso si se tiene idea de la fenomenotécnica que hay detrás de los experimentos de Hertz, esto permitirá hacer un balance de lo que se conoce de la onda electromagnética.

**Sesión II:** ¿Quiénes construyeron la teoría electromagnética y que es la teoría electromagnética?

**Propósito:** Construir un andamiaje entre lo que se logró construir la clase inmediatamente anterior, y en cómo algunos físicos, contribuyeron a la construcción de una teoría como estas, además de poner de presente las problemáticas que presentaba la idea de acción a distancia, y las implicaciones que esto tiene dentro de una teoría de electromagnetismo como esta, situando la onda electromagnética como parte de esta teoría, teoría de campos de Maxwell.

**Sesión III:** Construcción conceptual y matemática

**Propósito:** Abordar aspectos conceptuales, que tuvo en cuenta Hertz, para intentar explicar un fenómeno, que no se había trabajado antes, la evolución conceptual que tuvo Hertz a lo largo de su trabajo, además se demuestra la existencia de la onda electromagnética matemáticamente, a partir de las

ecuaciones de Maxwell, explicando a la vez la evolución que tuvieron estas, pasar de 20 ecuaciones a 4, poniendo de presente que el mismo Hertz demostró matemáticamente la existencia de las ondas electromagnéticas con una matemática muy usual en la época de él, vectorialmente.

#### **Sesión IV:** Experimentalmente

**Propósito:** Ilustrar la idea de la onda electromagnética, a partir de un análisis de algunos de los experimentos que realizó Hertz, antes de llegar al experimento crucial, esto con el fin de que los estudiantes creen ideas frente a los objetivos que habían detrás de cada uno de esos experimentos, por último, se mostrara el experimento donde se ve la chispa de la que siempre hablo Hertz, como esta viaja de un lado a otro para encender un bombillo.

#### **Sesión V:** Balanceo de los conocimientos adquiridos

**Propósito:** A partir de las construcciones conceptuales, se realizará un balanceo frente a los conocimientos de ello, como forma de concluir la propuesta didáctica se realizará la explicación de cada uno de los aspectos por medio del mapeo cartográfico construido, esto con el fin de fortalecer algunas de las ideas ya abordadas anteriormente. Aunque hay un mapeo general realizado por el maestro, el mapeo a evaluar es que el van a construir los estudiantes a partir de lo trabajado en cada una de las secciones.

Como lo voy a evaluar

A partir de la construcción de un mapeo cartográfico por parte de los estudiantes, donde expondrán lo que ellos consideran que es una onda electromagnética, a partir de los aspectos abordados en cada una de las secciones planteadas anteriormente.

#### Bibliografías

Aierbe, O. A. (30 de junio de 2017). Propuesta de unidad didáctica. Propuesta de unidad didáctica.

GiancoliI, D. C. (2008). Física para las ciencias e ingeniería (4a. ed.). México: Pearson educación.

Mosca, T. (2005). Física para la Ciencia y la Tecnología (Movimiento). Editorial Reverté.