

**UN ESTUDIO HISTÓRICO SOBRE EL CONCEPTO DE CORRIENTE  
ELÉCTRICA: UNA APROXIMACIÓN DE LA FÍSICA CLÁSICA A LA  
FÍSICA MODERNA**

**Álvaro Steven Sánchez Cubides**

**Asesora:  
Mg. Sandra Bibiana Avila Torres**

**Línea de Investigación:  
la enseñanza de la física y la relación física matemática**

**Trabajo de Grado para optar por el título de licenciado en Física**

**Universidad Pedagógica Nacional  
Facultad de Ciencia y Tecnología  
Departamento de Física  
Bogotá D.C. – Colombia  
2024**

## **AGRADECIMIENTOS**

Quisiera agradecerle mediante estas palabras a todas aquellas personas que han estado conmigo en este largo y difícil camino, agradecerles de todo corazón porque me brindaron su apoyo y cariño.

En primer lugar, me gustaría agradecer a la profesora Sandra Bibiana Ávila, asesora de este trabajo, agradecer por su apoyo, por sus consejos y sugerencias y también por su gran dedicación, los cuales permitieron que fuera posible completar este trabajo.

Quiero ofrecer mis más sinceros agradecimientos a Adriana Lucia Pineda, que ha estado conmigo durante en este proceso, agradezco por su compañía, apoyo y amor.

Quiero agradecer a mi familia, a mis amigos y compañeros que de una u otra manera me han ayudado para seguir adelante. Y, por último, no puedo dejar de mencionar a los profesores del departamento de física, los cuales me han motivado y ayudado en esta hermosa labor y a enamorarme de la física.

## CONTENIDO

<b>INDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>4</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>6</b>
<b>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....</b>	<b>8</b>
<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>10</b>
Objetivo General.....	10
Objetivos Específicos.....	10
<b>ANTECEDENTES .....</b>	<b>11</b>
<b>METODOLOGÍA.....</b>	<b>13</b>
<b>CAPITULO 1: SURGIMIENTO DE LOS CONCEPTOS DE CORRIENTE ELÉCTRICA, CONDUCCION ELÉCTRICA Y SU INTERPRETACIÓN DESDE LA FÍSICA.....</b>	<b>14</b>
1.1 La electrificación y los primeros fenómenos eléctricos estudiados por el ser humano. ....	14
1.2 Estudios alrededor de la comunicación eléctrica y la caracterización de dos tipos de electricidad.....	15
1.3 Sobre el almacenamiento del fluido eléctrico: invención de la Jarra de Leyden y sus consecuencias en la experimentación. ....	19
1.4 Partículas conductoras como medio para explicar la comunicación eléctrica.....	25
1.5 Primera formalización de la corriente eléctrica: la corriente galvánica, la creación de fluido eléctrico y el estudio del desprendimiento de calor en conductores. ....	28
<b>CAPÍTULO 2: DE LA ELECTRICIDAD A LA IDEA DEL ELECTRÓN EN EL CONCEPTO DE CORRIENTE ELÉCTRICA.....</b>	<b>40</b>
2.1 Maxwell y el estudio de las consecuencias de los modelos teóricos de corriente eléctrica.....	40
2.2 J.J. Thomson y el descubrimiento del electrón: la corriente como movimiento de partículas.....	44
<b>CAPÍTULO 3: FENÓMENO DE LA CORRIENTE ELÉCTRICA EN EL SIGLO XX .....</b>	<b>48</b>
3.1 Modelo de gas de electrones libres - Paul Drude y Arnold Sommerfeld .....	48
3.2 Modelo de conducción en los metales mediante el estudio de las interacciones en la red - Félix Bloch .....	54
3.3 Conducción en los sólidos, explicación desde la teoría de Bandas - Sir Alan Herries Wilson.....	58

<b>CAPITULO 4: LOS PARES DE COOPER EN EL FENÓMENO DE LA SUPERCONDUCTIVIDAD.</b> .....	<b>64</b>
<b>CONSIDERACIONES PEDAGOGICAS</b> .....	<b>72</b>
<b>ANÁLISIS Y CONCLUSIONES</b> .....	<b>73</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFIAS</b> .....	<b>76</b>
<b>ANEXO</b> .....	<b>80</b>

## INDICE DE FIGURAS

<i>Ilustración 1: Máquina electrostática de Otto Van Guericke tomado de <a href="https://www.youtube.com/watch?v=IWjisCgS_hE">https://www.youtube.com/watch?v=IWjisCgS_hE</a></i> .....	15
<i>Ilustración 2: Fragmento del texto (Stephen, 1735)</i> .....	16
<i>Ilustración 3: Lista de materiales eléctricos por Stephen Gray (Stephen, 1731)</i> .....	17
<i>Ilustración 4: Experimento de comunicación eléctrica de Gray (Sparkmuseum, s.f.) (Stephen, 1731)</i> .....	18
<i>Ilustración 5: Fragmento de texto. (Francois de Cisternay, 1733)</i> .....	18
<i>Ilustración 6: Dibujo de Van Musschenbroek, configuración del experimento 47 (Present, 2019)</i> .....	20
<i>Ilustración 7: Jarra de Leyden, Experimento de Benjamín Franklin. (Ilustración propia).</i> .....	22
<i>Ilustración 8. Experimento de Charle-Agustín de Coulomb (ilustración Propia)</i> .....	27
<i>Ilustración 9: The experimento of Galvani the metallic (Piccolino &amp; Bresadola , 2013)</i> .....	29
<i>Ilustración 10: Instrumento de Volta para generar corriente por contacto (Volta, 1792, pág. 87)</i> .....	31
<i>Ilustración 11 a: Representación geométrica por Ohm para una cadena Galvánica heterogénea de dos secciones (Ohm, 1827). b. Cadena galvánica de dos secciones (Ilustración propia)</i> .....	32
<i>Ilustración 12: Experimento realizado por Joule en 1840. A) Bobina de alambre en un tubo de vidrio. B) Frasco de Vidrio y T) el termómetro. (Joule, 1840)</i> .....	37
<i>Ilustración 13: Figura incluida en el artículo de 1897, que representa los instrumentos utilizados por Thomson en sus experimentos (Sánchez Ron, 1997)</i> .....	45
<i>Ilustración 14: a. Modelo de electrones libres de Sommerfeld. b. Representación del movimiento aleatorio los electrones en presencia de un campo eléctrico y la velocidad media del gas de electrones (ilustración propia).</i>	50
<i>Ilustración 15: Variación del vector de onda de los electrones en función del tiempo (Melendez Ramirez, 2012)</i>	51
<i>Ilustración 16: Fragmento de tabla de conductividad eléctrica en <math>106\Omega - 1\text{cm} - 1</math> de varios elementos metalicos con relacion a distintas temperaturas (Melendez Ramirez, 2012).</i> .....	53

<i>Ilustración 17: Ecuación del trabajo de Bloch (Bloch, 1929, pág. 584).....</i>	<i>56</i>
<i>Ilustración 18: Representación de la teoría de Bandas de Sir. Alan Herréis Wilson. (Ilustración propia).....</i>	<i>61</i>
<i>Ilustración 19: Muestra original de Kamerlingh Onnes 1911, resistencia frente a temperatura absoluta para el mercurio (Melendez Ramirez, 2012).....</i>	<i>65</i>
<i>Ilustración 20: Diagrama de Feynman para la interacción electrón – electrón mediante intercambio de un fonón (Melendez Ramirez, 2012).....</i>	<i>69</i>
<i>Ilustración 21 a) Banda de conducción en el estado normal. b) banda prohibida de energía en un superconductor, <math>E_g</math> se exagera en la figura, su valor está alrededor del orden <math>E_g \sim 10^{-4} \text{ eV}</math> (Kittel, 1998).....</i>	<i>70</i>

## **INDICE DE ECUACIONES**

<i>Ecuación 1.....</i>	<i>33</i>
<i>Ecuación 2.....</i>	<i>33</i>
<i>Ecuación 3.....</i>	<i>34</i>
<i>Ecuación 4.....</i>	<i>34</i>
<i>Ecuación 5.....</i>	<i>34</i>
<i>Ecuación 6.....</i>	<i>35</i>
<i>Ecuación 7.....</i>	<i>35</i>
<i>Ecuación 8.....</i>	<i>35</i>
<i>Ecuación 9.....</i>	<i>38</i>
<i>Ecuación 10.....</i>	<i>43</i>
<i>Ecuación 11.....</i>	<i>53</i>
<i>Ecuación 12.....</i>	<i>54</i>
<i>Ecuación 13.....</i>	<i>57</i>
<i>Ecuación 14.....</i>	<i>71</i>

## INTRODUCCIÓN

**“Es de gran ventaja para el estudiante de cualquier tema, leer las memorias originales sobre ese tema, porque la ciencia siempre se asimila más completamente cuando está en estado incipiente” (Maxwell, 1873)**

Los fenómenos asociados a la corriente eléctrica a lo largo de la historia siempre han generado atractivo y asombro, no solo por su comportamiento tan peculiar a nivel macroscópico y microscópico, sino por el potencial que tienen en la aplicación y desarrollo tecnológico. Es por esta razón que, a lo largo de la historia de la física, un gran número de científicos se han embarcado en su estudio con el objetivo de lograr comprender y describir dichos fenómenos.

Es así como este trabajo se enfoca, desde una reconstrucción histórica, en los conceptos de la corriente eléctrica y la conducción eléctrica, para abordar aquellos aspectos que fueron relevantes en la electricidad, además, de analizar desde los documentos originales de algunos físicos, la manera en que ellos realizaron sus estudios y proponían sus teorías, en búsqueda de llegar a una comprensión y descripción de los fenómenos eléctricos, para que finalmente fueran la base para establecer la teoría alrededor de los conceptos de corriente eléctrica y de conducción eléctrica, que se manejan hoy en día.

En el primer capítulo del documento se encuentra una descripción respecto a la historia de la Electricidad, la cual comienza cuando Tales de Mileto realiza los primeros experimentos con respecto a los efectos electrostáticos. Tiempo después distintos pensadores continuaron en este estudio como William Gilbert, Stephen Gray y Pieter Van Musschenbroek, de los cuales se reconoce que lograron caracterizar a diferentes cuerpos entre sustancias eléctricas y aneléctricas y realizaron experimentos para comprender la comunicación eléctrica, pero lo que más se destaca es el desarrollo del instrumento que permitió almacenar la corriente por primera vez, llamado la Jarra de Leyden. Esta invención permitió que otros físicos pudieran evolucionar la manera en que se realizaban los experimentos eléctricos, de esto se destaca los trabajos de Benjamín Franklin, Charle Augustin de Coulomb y Henry Cavendish quienes profundizan en el entendimiento de la naturaleza de la corriente eléctrica y su relación con los fenómenos naturales como el rayo.

Además, un descubrimiento impactante en la historia de la electricidad sucedería tras los trabajos realizados por Luigi Galvani y Alessandro Volta, donde su principal logro fue descubrir una nueva forma de producir la corriente eléctrica a través de reacciones químicas, la cual se le llama la Cadena Galvánica o Pila de Volta. Descubrimiento que generaría un cambio sustancial en la forma de realizar los experimentos eléctricos, ya que se contaba con un instrumento el cual permitirá realizar montajes más perdurables, pero menos intensos que la Jarra de Leyden.

Es así como cada vez más físicos se iban sumando a la labor del estudio y comprensión de los fenómenos eléctricos, aportando desde sus propios conocimientos con ideas que buscaban poder describir dichos fenómenos. Así mismo estos no dejaban de asombrar a la humanidad, con cada nuevo efecto que se descubría. Entre los que podemos nombrar la relación electricidad-magnetismo, el desprendimiento de calor, las fuerzas entre corrientes, los rayos catódicos y muchísimos más.

Pero hubo un momento en la historia de la electricidad que fue fundamental en el camino de la construcción del conocimiento, que permitió romper con la indecisión que había hasta cierto punto, ya que existían diferentes modelos teóricos que buscaban poder describir los fenómenos eléctricos, por lo que no había ninguna teoría establecida. En la primera parte del segundo capítulo se realiza un análisis de dichos modelos teóricos con base en el Tratado de Electricidad y Magnetismo de Maxwell. Después de esto, se continúa abordando el suceso que ocurrió a finales del siglo XIX, donde a partir de una serie de experimentos se logra el descubrimiento del electrón, lo cual generara que se establezca un paradigma que guiaría la manera en que se continuarían los estudios de los fenómenos eléctricos, este sustentando fuertemente en que la naturaleza de la corriente eléctrica es debido al movimiento de partículas con carga y masa a través de un metal.

Como consecuencia del descubrimiento del electrón, a comienzos del siglo XX se comienza a modelar la corriente eléctrica como el movimiento de electrones a través de un conductor, y por tanto fue el cimiento para que los siguientes físicos continuaran con sus estudios con respecto a los fenómenos de la corriente eléctrica y la conducción eléctrica. Así de este modo el físico Paul Drude propone su modelo teórico para la corriente eléctrica con base a la idea del gas de electrones. En el tercer capítulo del documento se realiza un análisis en la evolución y transformación de dicho modelo, ya que gracias al desarrollo de la teoría cuántica y los trabajos realizados por diferentes científicos como Sommerfeld, Bloch, Sir. Alan Herréis Wilson, entre otros, se logra construir una fuerte teoría para comprender y describir los fenómenos de la corriente eléctrica y la conducción eléctrica.

Gracias a la construcción de dichas teorías se logran avances en el desarrollo tecnológico, precisamente con el trabajo de Sir. Alan Herréis Wilson, en su estudio de los semiconductores, con el cual se logra la invención del transistor y muchos de los avances microelectrónicos que han revolucionado la tecnología desde la segunda mitad del siglo XX.

Para la época, aunque se logra responder a muchas de las preguntas que se habían formulado tiempo atrás con respecto a los fenómenos de la electricidad, aún quedaban situaciones que no eran comprendidas, es el caso del fenómeno de la superconductividad, en el cual la teoría propuesta para describir la corriente eléctrica y conducción eléctrica no contaba con lo suficiente para comprender y describir dicho fenómeno. Es así como en el cuarto capítulo del documento se realiza una reconstrucción histórica desde del descubrimiento del fenómeno de la

superconductividad, hasta la construcción de la teoría BSC, la cual es la primera teoría aceptada para describir la superconductividad, y con base en el modelo de los pares de Cooper, esta teoría realiza una aproximación a la descripción de la corriente superconductor.

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

En la historia de la humanidad, la Física como ciencia ha jugado un papel muy importante en el estudio y la comprensión del universo. Desde hace varios siglos teorías importantes han surgido en su desarrollo, como es el caso del trabajo realizado por Galileo Galilei en el siglo XVI y su estudio de la cinemática, también se encuentra Isaac Newton en el siglo XVII y su trabajo “*Principios matemáticos de la filosofía natural*”, donde estructura la mecánica y la ley de gravitación universal. Un tiempo después, en los siglos XVIII y XIX surgen dos grandes teorías, la termodinámica y el electromagnetismo, las cuales tuvieron un gran impacto en la industria y los avances tecnológicos de la época, así como en las futuras generaciones.

A finales del siglo XIX se creía que las teorías de la física, establecidas hasta ese momento, describían completamente los fenómenos de la naturaleza; sin embargo, en las primeras décadas del siglo XX florece lo que se denomina la Física Moderna. En esta se establecieron teorías alrededor de dos tipos de fenomenología, la Mecánica Cuántica alrededor del estudio del comportamiento del mundo microscópico y la Teoría Especial y General de la Relatividad desarrollada por Albert Einstein, en la cual a partir de un cambio de paradigma con un dinámico espacio-tiempo llegó a un entendimiento más completo del comportamiento del universo.

Con el desarrollo de las teorías de la física Clásica y Moderna, se ha logrado como sociedad un gran número de sorprendentes avances tecnológicos, que han posibilitado mejorar la calidad de vida en aspectos tales como el transporte, la comunicación, la salud, la industria, la investigación entre otras. Es así como hoy en día la enseñanza en ciencias y el avance tecnológico son claves en los procesos de desarrollo, y no solo responden a las necesidades de la sociedad, si no que posibilitan mejores condiciones, gracias a una participación ciudadana y a un desarrollo sostenible (Quintanilla Gatica, 2016).

A nivel de América Latina existe una problemática que resalta Quintanilla, el cual menciona que existe un gran porcentaje de fracaso en la enseñanza de las ciencias, debido a aspectos como la calidad de la enseñanza, la deserción estudiantil, el desaliento de los docentes, la escasez de recursos, entre otros factores (Quintanilla Gatica, 2016). En esta medida se ve necesario fortalecer la enseñanza de las ciencias desde los primeros años de secundaria y así lograr que se aumente la contribución que realiza la escuela en la formación e inspiración de los futuros científicos y científicas del país. De esta forma se responde a lo planteado por el Ministerio de Educación Nacional (MEN): “En un mundo cada vez más complejo, cambiante y desafiante, resulta apremiante que las personas cuenten con los conocimientos y herramientas necesarias que proveen las ciencias para comprender su entorno y aportar a su transformación” (Ministerio de Educación Nacional, 2006).

Considerando lo anterior y puntualizando en la enseñanza de la física, se presenta una problemática respecto a la manera en que se lleva al aula, ya que, generalmente se desarrolla de manera tradicional, esto quiere decir que se enfoca en la resolución de problemas de libro, en la transmisión de información y la memorización de conceptos. Esto conlleva a que se desconozca las condiciones sociales, científicas, ideológicas e históricas en las que se produce el conocimiento, llegando a caer en el error en las clases de física de asumir que la ciencia es absoluta e irrefutable (Quintanilla Gatica, 2016). Como consecuencia, los estudiantes ven la imagen de la física como una materia que, dada su elevada exigencia intelectual, solo puede ser desarrollada y entendida por algunos que poseen un conocimiento superior (Camelo Bustos & Rodríguez Sotelo, 2008).

Continuando con las problemáticas en la enseñanza de la física en la zona de América Latina, se encuentra que las instituciones formales e informales no le dan la relevancia a la reflexión acerca de la producción de conocimiento desde una mirada histórica (Quintanilla Gatica, 2016). Es por esto por lo que, al omitir la historia en la enseñanza de la física, se invisibiliza el trabajo realizado por muchos científicos y científicas, que han contribuido al continuo desarrollo del conocimiento en distintas épocas. Lo que conlleva a que se pase por alto que la ciencia es una construcción sociocultural, producto del trabajo de cientos de mujeres y hombres (Camelo Bustos & Rodríguez Sotelo, 2008).

Desde los estándares básicos de competencias en ciencias naturales para el entorno físico en secundaria, el MEN propone contenidos para la enseñanza de la física con temas en relación con la mecánica, la termodinámica y el electromagnetismo (Ministerio de Educación Nacional, 2006). Donde se puede ver que la enseñanza de la física, en materia de contenido en el aula, prioriza al abordaje de temas que solo involucran a la física clásica; es cierto que en la física clásica existen fenómenos que son impresionantes, pero como lo dice Ostermann y Moreira “Los estudiantes no tienen contacto con el existente mundo de la física actual, pues la física que ven no pasa de 1900. Dicha situación es inaceptable en un siglo en el cual ideas revolucionarias han cambiado totalmente la ciencia” (Ostermann & Moreira, 2000, pág. 391). Considerando lo anteriormente expuesto se ve necesario fortalecer la enseñanza de la física con un enfoque que involucre la transición histórica de la física clásica a la física moderna.

Al no involucrar un estudio histórico en las clases de ciencia se desconoce el origen y la evolución de los conceptos, de este modo se infravalora y se omite que la ciencia es resultado también de errores, obstáculos, dificultades y retos, que dieron pie para que seres humanos pudieran construir el conocimiento (Camelo Bustos & Rodríguez Sotelo, 2008).

Otra de las problemáticas que se encuentra presente en la enseñanza de las ciencias, consiste en que los textos habitualmente definen algunos conceptos de una forma teórica y absoluta, sin tener en cuenta el proceso histórico que ha pasado para su consolidación, como las dimensiones experimentales y el carácter problemático que enfrentaron sus pensadores (García Martínez, 2005). En este mismo sentido Mario Quintanilla apoyado en Stephen Toulmin menciona que el conocimiento está vivo y la ciencia es dinámica, por lo que los conceptos, modelos y teorías

terminan siendo remplazadas o complementadas por otros, gracias a marcos teóricos, instrumentos disponibles y perspectivas innovadoras de cada época (Quintanilla Gatica, 2016).

Este es el caso de los conceptos de corriente eléctrica y conducción eléctrica que, gracias a una gran cantidad de científicos y experimentos, se ha logrado construir la teoría eléctrica como la conocemos hoy en día. Particularmente en la Universidad Pedagógica Nacional, no se encuentran trabajos o investigaciones en el repositorio que se hayan dedicado a realizar un estudio puntual de la evolución en los modelos teóricos propuestos por distintos físicos, alrededor de los fenómenos relacionados con la corriente eléctrica y la conducción eléctrica. Adicionalmente, a pesar de haber algunos trabajos que abordan fenómenos afines con la superconducción, no se encuentra alguno que se enfoque específicamente en la descripción de la fenomenología de la corriente superconductora, siendo este un fenómeno propio de la física moderna.

Con lo presentado anteriormente se propone la siguiente pregunta que guiará la investigación:

¿Cómo a partir de un estudio histórico del fenómeno de conducción eléctrica, desde la física clásica hasta la física moderna, es posible mostrar la evolución del concepto de corriente eléctrica?

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo General.**

Realizar una revisión sobre la evolución del concepto de corriente eléctrica, desde el origen del estudio de los fenómenos asociados a la conducción en la física clásica hasta la transición a la física moderna, mediante un estudio histórico, en busca de generar un insumo que fortalezca la inclusión de la historia en las clases de electromagnetismo.

### **Objetivos Específicos.**

- Presentar una reconstrucción histórica del origen de los fenómenos eléctricos y la conducción eléctrica, hasta las primeras definiciones de corriente eléctrica en el siglo XIX.
- Describir las consecuencias sobre los modelos teóricos de corriente eléctrica en la segunda mitad del siglo XIX, que surgen a partir de la publicación del Tratado de Electricidad y Magnetismo y el descubrimiento del electrón.
- Analizar la evolución de los modelos de corriente eléctrica en el siglo XX a partir de las consecuencias del descubrimiento del electrón, el surgimiento de la mecánica cuántica y la descripción de la corriente superconductora desde la teoría de los pares de Cooper.
- Sintetizar la evolución histórica de los conceptos de conducción eléctrica y corriente eléctrica, en un material que aporte a la enseñanza de la corriente en electromagnetismo desde la perspectiva histórica.

## ANTECEDENTES

Para la elección de los antecedentes tomados se tuvo en cuenta diferentes criterios como los siguientes: la historia de la física, la fenomenología de la corriente eléctrica y la superconductividad, la importancia de llevar la enseñanza de la física moderna a la educación media, la evolución conceptual de la conducción eléctrica, así como los modelos teóricos y experimentos involucrados y el papel del docente en la incorporación de tópicos modernos de la física. También se consideró que los trabajos abarcaran diferentes puntos de vista desde su contexto por lo cual se tomó: desde lo local, la Universidad Pedagógica Nacional, también a nivel de Colombia y una mirada internacional de Argentina, Brasil y España para poder identificar relaciones entre problemáticas, estrategias y conclusiones.

1. *“El Efecto Hall: Hacia una conceptualización de la corriente eléctrica. Análisis histórico y Experimental”* realizado por José Miguel Gonzales Alfaro, de la Universidad Pedagógica Nacional y publicado en el año de 2016. En este trabajo el autor presenta como eje central de su investigación el Efecto Hall. En la primera parte de su trabajo se dedica a realizar una recopilación histórica, relacionada con la naturaleza de la corriente eléctrica y la carga eléctrica, priorizando la historia del electromagnetismo ya que esto le permite realizar un análisis desde la contribución al conocimiento científico. Luego continua su trabajo con el estudio de los orígenes del efecto Hall y lo referente a los experimentos realizado a partir de estudiar los textos originales de Hall; Menciona que es importante realizar la investigación de esta manera ya que le permite tener un dialogo directo con el autor, además, todo en búsqueda de la enseñanza de las ciencias.
2. *“Un salto al estado superconductor en el aula”* realizado por Cristhian Camilo Ramírez M de la Universidad Pedagógica Nacional en el año 2018. En este trabajo, el autor se remite al problema de la vista deshumanizante a la ciencia, identificado en el aula como un proceso lineal de repetición de fórmulas, el cual responde a unos estándares curriculares en las clases de ciencias, ello limita al docente en cuanto a tópicos de enseñanza, lo que da como resultado que el estudiante no tenga contacto con el mundo real. Por ello su propuesta es llevar experiencias sensibles que permitan encontrar una relación entre el mundo de las ciencias, los avances tecnológicos y el mundo moderno. Expone la necesidad de educar a los estudiantes con tópicos modernos como la superconductividad ya que su aplicación se encuentra en varios campos de la ciencia como la física y la ingeniería para nuevas tecnologías. Su propuesta es plantear una ruta para desarrollar el estado de superconductividad en el aula del colegio instituto técnico Laureano Gómez a partir de experiencias sensibles experimentales que involucren a los estudiantes. En sus conclusiones se menciona que, en países como Colombia, es pertinente y necesario enseñar a niños y jóvenes del siglo XXI una ciencia que le permita entender el mundo del siglo XXI.
3. *“Física contemporánea en la escuela secundaria: una experiencia en el aula involucrando formación de profesores”* realizado por Fernanda Ostermman y Marco Antonio Moreira, en el año 2000 en Brasil, Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Este trabajo pone en contexto la problemática que existe a la hora de llevar tópicos de la física

moderna y contemporánea a los lineamientos curriculares de la educación secundaria. Plantea como objetivo llevar dos tópicos de física moderna con docentes en formación hacia a los grados de noveno, decimo y undécimo. Primero se eligen los temas, uno de ellos es el fenómeno de la superconductividad, donde se argumentó la importancia y viabilidad en este escenario, luego dan paso a la construcción de material necesario para las clases, y la preparación de los docentes en formación en estos tópicos. Después dan paso al proceso de implementación con un total de 271 estudiantes de educación media y con 12 docentes en formación. Entre sus resultados se resaltan la importancia de la calidad del material que se requiere para la enseñanza de la física moderna, la buena preparación de los docentes y su motivación hacia el cambio ya que los estudiantes siempre están dispuestos a explorar temáticas novedosas.

4. “*La enseñanza de la física cuántica: una comparativa de tres países*” realizado por Eduardo Miguel Gonzales (Doctor en ciencias físicas, argentina), Zulma Estela Muños (Magister en Educación, Colombia) y Jordi Solbes (Doctor en ciencias Físicas, España). En el año 2020 en colaboración de los tres países. Este trabajo fue realizado en colaboración de tres expertos en ciencias de diferentes países, el objetivo principal es identificar y hacer un análisis en los problemas relacionados a la enseñanza de la física moderna más específicamente la enseñanza de la física cuántica con respecto a cada país. Se identifican problemas tales como la poca importancia que se le da a la física moderna en los lineamientos curriculares en la educación secundaria, además de analizar la formación de los docentes en educación superior, ya que en su formación no se encuentra un fortalecimiento con una didáctica de la enseñanza de la física cuántica, lo que provoca que el manejo del tema sea vago e impreciso y como consecuencia el aprendizaje en lo estudiantes se da con interpretaciones confusas e incorrectas. Exponen la existencia de la brecha entre el desarrollo tecnocientífico y la enseñanza de la ciencia en las aulas, ya que en el aula no se considera que la ciencia se encuentra en relación con la vida real. Concluyen la necesidad de realizar la actualización en los lineamientos curriculares para permitir que los estudiantes tengan una formación más pertinente con respecto al mundo en el que viven y los rodea.

## METODOLOGÍA

El desarrollo de este trabajo se encuentra fortalecido con una metodología de investigación y de análisis cualitativo, la cual permitió un acercamiento y entendimiento de la realidad; con descripción del hecho en pro de entender y comprender el fenómeno (Ruiz, 2012). Por lo que se centró en la construcción de la formalización del fenómeno físico, para explorar a profundidad el fenómeno, desde el análisis hasta su comprensión, la forma se fundamentó en cómo nos lo dice Ayala Manrique, Malagón Sanchez y Osorio Sandra:

“Corresponde a procesos cognitivos en los que se reconoce que formalizar no se limita a sobreponer una estructura formal o una estructura matemática a un fenómeno para analizarlo y comprenderlo, sino que se requiere ante todo construir la posibilidad misma de formalizarlo y matematizarlo, es decir, de construir las magnitudes, relaciones, etc. con la que damos cuenta del fenómeno” (Osorio, Ayala, & Malagon , 2013).

Además, para la estrategia de investigación se utilizó la técnica del análisis documental, que según Alfonso (1995) se reconoce como un procedimiento científico, un proceso sistemático de indagación, recolección, organización, análisis e interpretación de información o datos en torno a un determinado tema, en el que el conocimiento se construye a partir de lectura, análisis y reflexión e interpretación de documentos (Morales, 2003). Donde el análisis documental se caracteriza mayormente por hacer uso de fuentes primarias, pero también cabe recalcar que en la medida de lo esencial el trabajo puede hacer uso de fuentes secundarias en los documentos necesarios para la investigación.

# CAPITULO 1: SURGIMIENTO DE LOS CONCEPTOS DE CORRIENTE ELÉCTRICA, CONDUCCION ELÉCTRICA Y SU INTERPRETACIÓN DESDE LA FÍSICA

Para abordar el surgimiento del concepto de corriente inicialmente se hará una breve descripción de la historia que abarca los primeros fenómenos de electrificación, pasando por los primeros filósofos y científicos en hacer formalmente afirmaciones sobre estos, para luego centrarse en las ideas alrededor de los fenómenos relacionados con la conducción hasta la formalización primaria de corriente dada matemáticamente por Dr. Georg Simón Ohm.

## 1.1 La electrificación y los primeros fenómenos eléctricos estudiados por el ser humano.

La Historia de la electricidad y el magnetismo se remonta a unos pocos siglos antes de nuestra era, en el año 600 A.C. en Grecia donde se registra que la primera persona en empezar a identificar efectos eléctricos y magnéticos fue Tales de Mileto. Este filósofo a partir de su experiencia de frotar ámbar con lana se dio cuenta que el ámbar se impregnaba de una propiedad que podía atraer a objetos pequeños como el polvo. Tales también notó que al acercar dos trozos de ámbar frotados se repelían entre sí y además que si se intensificaba el proceso de frotar los objetos podían saltar algunas chispas. Este comportamiento de atraer y repeler objetos también lo había identificado con la magnetita. Por lo que la hipótesis que proponía para explicar tal comportamiento es que los objetos tenían una ganancia de “alma” ya que lograban atraer a otros objetos inanimados (Ibar Romero, 2006).

Sin embargo, a pesar de tener esta explicación inicial desde la época de los griegos, en la cual se realiza una primera descripción de los fenómenos asociados con la atracción y repulsión eléctrica o magnética debido a propiedades adquiridas de los cuerpos o propiedades propias de estos, no fue hasta el siglo XVII que este tipo de fenómenos llamaron la atención de otros pensadores. Puntualmente se inicia la indagación formal en el año 1600 en Londres, cuando William Gilbert publica su obra “*De magnete, magneticisque corporibus, et de magno magnete tellure*” (On the Magnet and Magnetic Bodies, and on the Great Magnet the Earth). En esta publicación expone su descubrimiento, el cual consiste en que la Tierra se comporta como un imán gigante, descripción que no se había propuesto previamente a pesar de haberse desarrollado dispositivos de navegación, basados en el uso del magnetismo. En el trabajo habla sobre el funcionamiento de la brújula, la cual básicamente consta de una aguja de hierro que ha sido magnetizada mediante frotamiento con magnetita y que apunta siempre hacia el norte terrestre, por lo cual el trabajo de Gilbert es revolucionario en su época.

En este tratado, se resaltan dos cosas importantes: la primera es respecto al estudio de los fenómenos eléctricos, ya que al igual que Tales de Mileto, Gilbert realizó estudios con el ámbar, pero en este caso prueba con distintos materiales y logra identificar diferentes comportamientos en estos, lo cual utiliza para realizar una clasificación respecto a la propiedad de ser una sustancia *electricita*, algunas de estas sustancias las denomina eléctricas (con atracción

electrostática) y a otras aneléctricas (sin atracción electrostática). El segundo aspecto importante de su tratado fue afirmar que los fenómenos magnéticos y eléctricos son totalmente diferentes e independientes, ya que, en su estudio del magnetismo existían objetos que no tenían relación con los fenómenos magnéticos, pero exhibían la propiedad de atraer o repeler otros objetos, por tanto, estos pertenecían a los fenómenos eléctricos (Pumfrey, 2002).

Algunos años después de la publicación de Gilbert, en el año de 1672, Otto Von Guericke con la intención de intensificar los efectos producidos al frotar ámbar, desarrolló lo que se considera como la primera máquina electrostática mostrada en la ilustración 1. En esta, Guericke dispone de una esfera de azufre (material que se consideraba eléctrico ya que permitía cargarse eléctricamente), él hacía girar rápidamente esta esfera con una manivela que se acoplada con una correa a su eje y se frotaba con diferentes materiales, de este modo se podía generar la electrificación, para evidenciarlo se colocaban dos esferas metálicas pequeñas cercanas a la esfera de azufre, con estas se producía el efecto de carga y descarga a partir de chispas entre las esferas y la esfera de azufre cargada. Estas evidencias llevaron a Otto a cuestionarse qué era la electricidad y en un primer instante plantea que, al poseer la cualidad de ser transferida, se podría considerar como un fluido (Ibar Romero, 2006).



Ilustración 1: Máquina electrostática de Otto Van Guericke tomado de [https://www.youtube.com/watch?v=IWjisCgS\\_hE](https://www.youtube.com/watch?v=IWjisCgS_hE)

Por tanto, es claro que los fenómenos eléctricos desde la antigüedad y especialmente en el siglo XVII generaban gran atractivo en pensadores y filósofos de la naturaleza, no solo por ver su comportamiento y tratar de describirlo, sino también por intentar comprender qué era lo que sucedía realmente en el interior de los materiales eléctricos y aneléctricos para que se den estos fenómenos. Es interesante evidenciar cómo la primera explicación de lo que sucede al interior de los cuerpos con esta propiedad eléctrica que podía ser transferida es darle la categoría de ser un fluido. Concepción que será adaptada y desarrollada por científicos tiempo después.

## **1.2 Estudios alrededor de la comunicación eléctrica y la caracterización de dos tipos de electricidad.**

Uno de los primeros físicos en cuestionarse sobre lo que sucedía internamente en los objetos con la corriente eléctrica<sup>1</sup>, es alguien del cual poco se conoce, Stephen Gray, quien alrededor de los

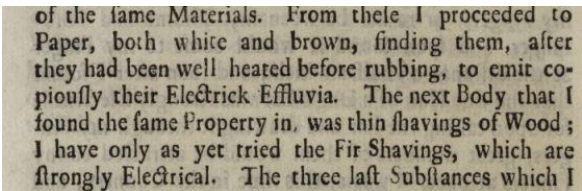
---

<sup>1</sup> Corriente viene del latín *Currens* o *Currentis* que significa el que corre. Y electricidad viene del griego *elektron* que significa ámbar. Por lo que la corriente eléctrica se refiere al efecto ámbar que corre o el efecto eléctrico que corre.

años de 1720-1735 enfocó sus experimentos y reflexiones al concepto de la conducción eléctrica con diferentes materiales. Lo que se conoce de su trabajo en relación con los efectos eléctricos está recogido en un conjunto de diferentes cartas dirigidas a su honorable amigo George Wheler, quien lo ayudo en varias ocasiones con sus experimentos, también se sabe de su trabajo porque Gray les escribía a los secretarios de la época de la Royal Society Hans Sloane y Cromwell Mortimer, para que sus cartas llegaran a los miembros de la Royal Society. Con éxito, algunas cartas fueron publicadas en Philosophical Transactions en los volúmenes 31,37,38 y 39.

De estas cartas se destaca lo siguiente: Uno de los arreglos experimentales en los cuales estuvo trabajando consistía en una esfera metálica pulida, colocada sobre un soporte de madera, al acercar a un lado de la esfera un cilindro de cristal el cual frotaba con seda y al lado opuesto acercar su mano o dedo producía un chasquido o chispazo, a lo que él llamaba “*Snapping o Sparks*”. En estos momentos comenzaron a surgir distintas preguntas para Gray como cuál era la naturaleza de esa chispa o las propiedades de los materiales; modificando el experimento, escogió no colocar su mano directamente sino un tubo o vara metálica colgado de seda como un atizador de hierro o unas tenazas que era lo que tenía al alcance, al hacer el experimento no tuvo el mismo efecto que con la mano, pero en el caso de acercar su mano al extremo contrario del tubo metálico se percató que si salía el chispazo casi simultáneamente desde la esfera al tubo y del tubo a su mano (Stephen, 1735).

Stephen Gray al analizar la chispa e identificar las consecuencias y sensaciones en su mano, teniendo en cuenta que le producía pinchazos, dolor y quemaduras y que también poseía el aspecto de brillar y sonar, llamó a este efecto “*Fuego eléctrico*”. En ocasiones repitió sus experimentos a oscuras donde era más fácil ver aquella luz, y desde un primer instante lo relacionó con la naturaleza del trueno y el rayo. Con respecto al experimento anterior, Gray establece ciertas conclusiones, ya que se percató que había materiales “*comunicantes*” que pueden “*comunicar*” la electricidad sin ninguna limitación. Entonces Gray concluye que existen materiales que tiene la característica de comunicar la electricidad. Además, como para la época se concebía la electricidad como un fluido, lo denominó “*Electrick Effluvia*” por su propiedad de fluir por los objetos, como se puede leer en el fragmento mostrado en la ilustración 2, tomada de “*Communicated in a Letter Experiments and Observations upon the Light That is Produced by Communicating Electrical Attraction to Animal or Inanimate Bodies, Together with Some of Its Most Surprising Effects to Cromwell Mortimer*” (Stephen, 1735).



of the same Materials. From these I proceeded to Paper, both white and brown, finding them, after they had been well heated before rubbing, to emit copiously their Electrick Effluvia. The next Body that I found the same Property in. was thin shavings of Wood; I have only as yet tried the Fir Shavings, which are strongly Electrical. The three last Substances which I

Ilustración 2: Fragmento del texto (Stephen, 1735)

Otro experimento que fue la base para sus descubrimientos con respecto a las propiedades de los materiales consistía en una bola de vidrio tapado en un extremo con un corcho, al frotarlo notaba

las propiedades de atracción del vidrio hacia otros objetos, como una pluma que él utilizaba para visualizarlo. Le llamó la atención el hecho de que en la parte del corcho se evidenciaba una concentración de electricidad, lo que lo llevo a pensar que existía un método de comunicar dicha electricidad. Los siguientes experimentos los realizó acoplando diferentes materiales al corcho, como varas de diferentes metales, los cuales colgaba verticalmente, Al evidenciar que estos materiales comunicaban la electricidad desde la bola de vidrio hasta el final donde se generaba el efecto de la chispa, le sirvió a Gray para descubrir lo que él denominó la *comunicación eléctrica*<sup>2</sup> (Stephen, 1731).

Al llegar a un límite respecto a la altura que podía colgar la bola de vidrio, intentó modificar el experimento y hacerlo de forma horizontal, cometiendo varios errores en el proceso; un error fue que al acoplar las varas metálicas utilizó materiales considerados eléctricos<sup>3</sup> en la época, los cuales se muestran en la Ilustración 3, los cuales no permitían realmente el paso de la electricidad, y otro error fue que utilizó soportes metálicos, por lo que la carga no viajaba hasta el extremo. El no identificar estos fallos experimentales lo llevó a pensar si la configuración vertical tenía alguna relación, hallando similitud con el efecto que se da cuando cae el agua, es decir como si la gravedad influyera en el efecto de fluir de la electricidad. Es por esto por lo que denominó a este tipo de electricidad como “*Electrick Vertue*”, ya que estaba en relación con lo vertical (Stephen, 1731)..

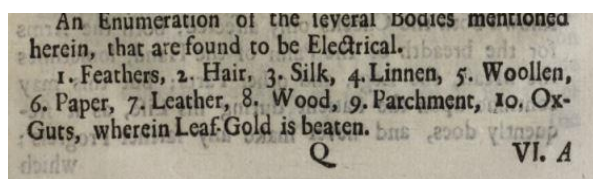


Ilustración 3: Lista de materiales eléctricos por Stephen Gray (Stephen, 1731)

Este resultado desfavorable lo encaminó a dejar de hacer configuraciones horizontales y a tratar de hacer sus experimentos verticalmente de nuevo, lo que lo llevó a buscar lugares más altos, como la cima de la cúpula de la catedral de St. Paul en Londres. Allí realizó sus experimentos de nuevo con resultados exitosos. En este lugar, Gray decide repetir el experimento en vertical pero con la configuración que había utilizado en horizontal (conectando las varas con materiales “eléctricos”), al hacerlo se da cuenta que tampoco llegaba la electricidad, no se comunicaba, gracias a esto identificó que aquellos materiales “eléctricos” como la seda (que será utilizado como aislante tiempo después) y el vidrio no conducen la electricidad y con este resultado modifica el experimento horizontal logrando esta vez tener resultados exitosos, la disposición en horizontal se muestra en la Ilustración 4. (Mr Stephen, 1731)

<sup>2</sup> Lo que en la actualidad se conoce como conducción eléctrica.

<sup>3</sup> Para la época los materiales eléctricos son los que se cargaban al frotarlos, en la actualidad los conocemos como aislantes o dieléctricos

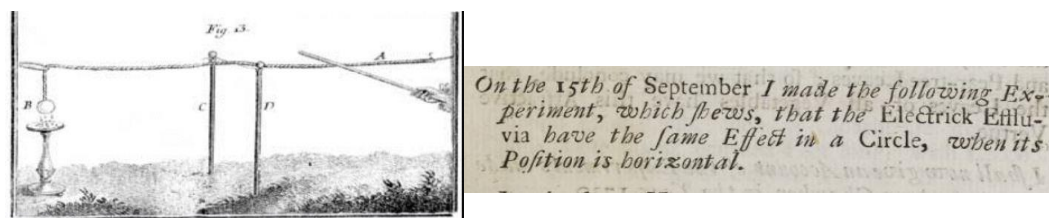


Ilustración 4: Experimento de comunicación eléctrica de Gray (Sparkmuseum, s.f.) (Stephen, 1731)

Por tanto, Gray logra mostrar que no es relevante el efecto de la gravedad en la forma en que fluye la electricidad por las varas metálicas y deja un precedente para ser evaluado y revisado por la Royal Society respecto a los fenómenos eléctricos.

Para esta época François de Cinternay Dufay fue el encargado por la Royal Society de realizar y verificar los experimentos de los cuales relataba Stephen Gray en sus cartas. Sin embargo, Dufay no solo se limitó a esto, dado que también le enviaba sus análisis y preguntas a Gray. Esto le ayudó a construir sus propias conclusiones las cuales publicó en el año de 1733 con su trabajo llamado *Discourse concerning Electricity* (Discurso sobre la electricidad), donde menciona la existencia de un principio universal respecto a la electricidad. La forma en que Dufay lo presenta se puede ver en la Ilustración 5. Este principio afirma la existencia de dos electricidades distintas, una de las cuales llamo *Vitreous Electricity*, y la otra *Resinous Electricity*; la primera en relación con el vidrio, piedras preciosas, lana y la segunda en relación con el ámbar, seda, teca entre otros cuerpos. Este principio dice que los cuerpos cargados atraen a los cuerpos que no lo están y también atrae a cuerpos si son del otro tipo de electricidad, por otro lado, repele a cuerpos que son del mismo tipo (François de Cisternay, 1733).

Seventhly, Chance has thrown in my Way another Principle, more universal and remarkable than the preceding one, and which casts a new Light on the Subject of Electricity. This Principle is, that there are two distinct Electricities, very different from one another; one of which I call *vitreous Electricity*, and the other *resinous Electricity*. The first is that of Glafs, Rock-Cryftal, Precious Stones, Hair of Animals, Wool, and many other Bodies: The second is that of Amber, Copal, Gum-Lack, Silk, Thread, Paper, and a vast Number of other Subftances.

Ilustración 5: Fragmento de texto. (François de Cisternay, 1733)

Otra de las conclusiones en el trabajo de Dufay es que los cuerpos se pueden cargar ya sea por frotamiento o calentamiento, e identifica una característica en cuerpos aneléctricos como los metales, los cuales no se pueden cargar por frotamiento, pero se pueden cargar por inducción al acercarlos a cuerpos ya cargados (François de Cisternay, 1733).

Hasta este momento en la historia, con la evidencia experimental presentada por Stephen Gay y Dufay se puede señalar la manera en que incrementaban los experimentos con respecto a los fenómenos eléctricos. Además, se encuentran discrepancias entre lo que es un material que puede ser cargado por frotamiento llamado “eléctrico”, pero que no es capaz de comunicar la electricidad y por tanto no permite que esta fluya por él, mientras que algunas sustancias aneléctricas como los metales eran perfectos para comunicar la electricidad de un lugar a otro, permitiendo un flujo de electricidad que parecía sin restricciones. Estos resultados generaban un

conjunto de interrogantes para los físicos de la época cuyo objetivo era buscar las mejores explicaciones al respecto, de lo cual surgieron preguntas alrededor de los fenómenos eléctricos como: ¿Cómo es que funciona la comunicación eléctrica? ¿Qué es lo que hace que algunos materiales tengan unas propiedades y otros otras propiedades? Además de ¿Qué es la electricidad y cómo funciona? Son preguntas que para el momento no se contaba con una explicación certera, pero que ya se comenzaban a cuestionar.

### **1.3 Sobre el almacenamiento del fluido eléctrico: invención de la Jarra de Leyden y sus consecuencias en la experimentación.**

La generación de preguntas es la forma en que fue guiada la investigación y estudio de Pieter Van Musschenbroek, otro científico que para el año de 1734 comenzó a estudiar los experimentos de Stephen Gray y de Dufay con sus respectivas conclusiones. Se dedicó a replicar los experimentos, pero en este caso realizando modificaciones con el objetivo de obtener conclusiones más elaboradas. Gracias a esto, publica un primer escrito llamado “*Experimenta in ambar aliisque corporibus virtutis electricae*” (Experimentos con ámbar y otros cuerpos con virtud eléctrica), en este trabajo llama al efecto de atracción eléctrico como *efecto ámbar*, el cual corresponde a la virtud eléctrica de los objetos. También menciona el termino Efluvios cuando se refiere al efecto de la electricidad al viajar por cables metálicos muy largos pero que no sucede con la seda, en correspondencia con los estudios que realizó Gray de la comunicación eléctrica (Present, 2019).

Continuando con los experimentos de Gray, realiza una modificación en como él utilizaba el envase de vidrio con el corcho, ya que se preguntó ¿cómo influía el contenido del envase en el efecto eléctrico? y descubrió lo siguiente: primero, al realizar el experimento de la misma manera que Gray, con aire en el interior del recipiente de vidrio, el corcho manifestaba la virtud eléctrica, sin embargo, cuando lo hacía al vacío el efecto de atracción eléctrica se intensificaba en la superficie del envase de vidrio que se frotaba y a su vez en el corcho no se identificaba aquella virtud eléctrica, por último, cuando lo hacía con arena contenida en el envase de vidrio el efecto era mucho más débil en la superficie frotada del envase de vidrio y en el corcho no se identificaba efecto eléctrico (Present, 2019).

Luego Musschenbroek, continúa su trabajo con el estudio sobre los resultados presentados de Dufay, puntualmente respecto a sus conclusiones donde menciona la existencia de dos tipos de electricidad, en este aspecto, Musschenbroek está totalmente de acuerdo, pero se plantea la siguiente pregunta: ¿Existirán más tipos de electricidad? Esto lo lleva a continuar su investigación sobre la naturaleza de la electricidad (Present, 2019).

La revisión de los experimentos y trabajos de Gray y Dufay, fueron la base para que Musschenbroek comenzara su propio estudio y en el año de 1745 comparte su manuscrito en relación con los experimentos eléctricos. Unos años después en el año 1748 adiciona las conclusiones a su obra llamada “*Institutiones physicae: conscriptae in usus academmicos*” (Instituciones físicas: registradas para uso académico) (Present, 2019).

Este manuscrito se caracteriza fuertemente por el objetivo general de Musschenbroek de querer matematizar los fenómenos eléctricos, para que estos tuvieran el mismo reconocimiento que se le atribuía a la mecánica Newtoniana. Es por ello que, al ser consciente de la dificultad de lograr dicho objetivo, afirma que es necesario de un gran número de experimentos mejor elaborados para lograr la teorización, o en sus palabras: “*Sin embargo, aún no poseemos un suministro suficiente de experimentos eléctricos para determinar con precisión la naturaleza, expulsión, retorno, movimiento y sutileza de los efluvios eléctricos*” (Present, 2019). Por tanto, la dificultad de un buen análisis decae en la complejidad de los experimentos eléctricos y el gran número de variables que contienen, por ello Musschenbroek realizó experimentos diferentes a los de sus predecesores, y gracias a su dedicación, la cual lo caracterizó como científico, le permitió lograr alrededor de 50 de ellos. Estos son los que relata a lo largo de su manuscrito, teniendo en cuenta su metodología de tener pequeñas variaciones que le permitan identificar aspectos relevantes.

Una parte de estos experimentos estaban a la base de la pregunta de ¿hasta dónde se extiende la fuerza eléctrica? Hay que recalcar que Musschenbroek utiliza el término de *fuerza* por influencia de la teoría de la gravitación universal, para hacer referencia a la atracción y repulsión eléctrica. Lo primero en su investigación fue estudiar la composición de la cera de foca, con el objetivo de identificar qué era lo que le daba esa característica de ser una sustancia “eléctrica”, de lo cual no obtuvo ningún resultado relevante. Luego, dadas las dificultades ambientales por el clima, ya que no le era posible el desarrollo de los experimentos, planteó investigar de qué manera modificarlos para combatir esa “debilidad de la electricidad”, como él la denominó. Allí concluyó que para lograr buenos resultados experimentales es importante priorizar un ambiente seco. Los resultados a los que llegó fue modificar el equipo con el que frotaba el vidrio, pasar de lana a cuero con almidón (Present, 2019).

Uno de los experimentos más importantes en su investigación consistía en un sifón de vidrio, especie de ducto en forma de herradura presentado en la Ilustración 6; a un extremo del ducto se introducía una parte de un primer alambre colgado en un tubo de hierro, el cual se electrificaba por inducción, al otro extremo un hombre parado sobre resina que sostenía un segundo alambre el cual una parte se introducía en el ducto. El objetivo de este experimento estaba de nuevo en relación con la distancia a la cual se podría generar un efecto de chispa o de electrificación, pero esta vez encerrando la electricidad en un ducto de vidrio, con lo cual se esperaba que el hombre que sostenía el segundo alambre se electrificara y pudiera desprender chispas a su alrededor lo cual no sucedió.

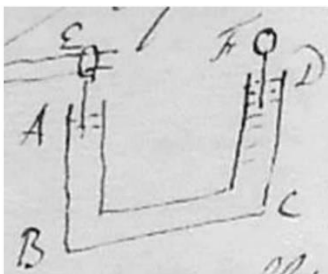


Ilustración 6: Dibujo de Van Musschenbroek, configuración del experimento 47 (Present, 2019)

Por experiencias anteriores, donde electrificaba un alambre que estaba en contacto con el agua, se dio cuenta que el agua cambiaba de sabor, lo cual lo llevó a cuestionarse si el agua también comunicaba la electricidad. A partir de esta experiencia, probó su experimento de nuevo modificándolo, de forma que colocó agua en el interior del sifón de vidrio. Cuando realizó la prueba con esta configuración, el hombre que sostenía el segundo alambre pudo generar chispas. En un segundo intento al insertar un poco de resina en el agua, evidenció que los efectos se potenciaban. De allí sacó una conclusión: habló del “*Compuesto eléctrico*” ya que decía que para producir estos efectos es necesario que cada material que se utilizaba perdiera “algo”, lo cual se mezcla y es lo que es la electricidad una “*materia eléctrica*” que puede ser transferida y transportada (Present, 2019). Con respecto a esta conclusión de Musschenbroek, es importante recalcar que para él existe un cambio importante en la sustancia, que está comunicando la electricidad en este caso el agua con resina, en este momento se identifican aspectos que muestran que la electricidad interactúa de alguna manera con los cuerpos por lo que fluye.

Finalmente, su investigación se encaminó a estudiar los tipos de vidrios que existen y su proceso de fabricación para así saber de qué manera estos influían en su experimento. Encontró que hay tipos de vidrios que ayudan a potenciar los efectos eléctricos, lo cual fue clave para los desarrollos posteriores, ya que el trabajo de Musschenbroek llega al desarrollo de su invención más conocida, nombrada la Jarra de Leyden. Por otro lado, con respecto a su investigación de la electricidad y los múltiples experimentos que realizó, trató de cuantificar los efectos, pero sin mayores resultados. Entre sus conclusiones se encuentra que la fuerza eléctrica es inversamente proporcional a la distancia a la que se aplica, pero por la cantidad de variables a tratar no logro matematizarlo, esto generó frustración en Musschenbroek (Present, 2019).

Adicionalmente en el trabajo de este científico respecto a las diferentes preguntas que guiaron su investigación, realmente fueron pocas las que solucionó y por tanto no logró dar una explicación concisa de los fenómenos eléctricos, una de ellas por ejemplo fue ¿Qué cuerpos detienen y cuáles facilitan la transmisión de la virtud eléctrica? Esto es debido que sus resultados generaron que los materiales que se consideraban para comunicar la electricidad aumentaran, ya que demostró que algunas sustancias líquidas también pueden cumplir con esta característica, por lo que la pregunta que más sobresale para él es ¿Qué caracteriza a los cuerpos o sustancias pueda comunicar la electricidad? Es decir, se plantea una pregunta que cuestiona lo que sucede internamente al paso de la corriente eléctrica.

Se puede evidenciar que a medida que se avanza en la historia respecto al estudio de los fenómenos eléctricos y la generación de nuevos y más elaborados experimentos, cada vez la pregunta ¿Qué es la conducción eléctrica? iba tomando más importancia en las investigaciones de los físicos, al punto de volverse el centro de futuras investigaciones, como veremos unos años más adelante con Benjamín Franklin. Sin embargo, el camino zanjado por los científicos aquí nombrados, se vuelve la base de los estudios futuros, sus conclusiones permiten el avance de las siguientes investigaciones y los artefactos que construyen, así como las caracterizaciones de los materiales ante la generación o el transporte de la electricidad se vuelve fundamentales para poder responder esta pregunta.

Uno de los científicos que logró relacionar de manera acertada los fenómenos eléctricos estudiados en el laboratorio y los que se generan de forma espontánea en la naturaleza fue Benjamín Franklin. Una de las características de Franklin que resultan importantes de resaltar es que él, antes de conocer los fenómenos eléctricos, no se le consideraba como científico y tampoco tenía tal formación, de hecho, su primer acercamiento a este tipo de experimentos fue gracias a Dr. Archibald Spencer en el año de 1746. Como consecuencia de este encuentro se despierta el interés de Franklin en la ciencia, y comienza a estudiar los fenómenos eléctricos, además, recibe la ayuda de una persona que se convertiría en un gran amigo Sr. Peter Collinson, el cual era miembro de la Royal Society y que se encargaba de suministrar información y dar equipo a Franklin si lo requería. Lo que se conoce de su vínculo, se reúne en un conjunto de cartas que se enviaban entre ellos, donde Franklin compartía sus experiencias, preguntas y sugerencias con respecto a los experimentos eléctricos. De las cartas que le envió Franklin a Sr. Collinson, este último realizó un conglomerado de las ideas e hipótesis que Franklin presentaba acerca de los experimentos eléctricos y las publicó en un libro llamado “Franklin Benjamin’s Experiments and Observations on electricity” en el año de 1754 en Londres (Franklin, 1909).

En una carta enviada el 28 de marzo de 1747 Franklin dice: “... *nunca antes estuve tan ocupado en ningún estudio que absorbiera tanto mi atención y mi tiempo*” (Franklin, The Autobiography of Benjamin Franklin, 1909), y es que Franklin se caracterizó por realizar un gran número de experimentos estudiando la electricidad en los años siguientes. De aquellos experimentos hay dos en particular con los que logra llegar a conclusiones importantes con respecto a la electricidad: el primer experimento es utilizando la Jarra de Leyden, en este experimento se dedicó a estudiar la chispa, la forma en que se genera la electricidad y su comportamiento. En sus cartas se evidencia que él utiliza el término de fuego eléctrico, término heredado de Stephen Gray. El arreglo de este primer experimento consistía en: tener dos jarras de Leyden idénticas, con el fin de que pudieran almacenar la misma carga, en la parte de arriba donde sobresalía la barra de metal le acopló unos ganchos metálicos como se ve en la Ilustración 7.



Ilustración 7: Jarra de Leyden, Experimento de Benjamín Franklin. (Ilustración propia).

Con este arreglo, Franklin notó que al acercar el gancho con el exterior de la botella esta se descargaba o quedaba en equilibrio, a lo que él llamó *estado natural*, por lo que para los siguientes experimentos procuraría que el gancho quedara lo bastante alejado de la botella. En las hipótesis que él planteaba para este experimento, decía que cuando una jarra se carga hay una

parte de ella que se encuentra dispuesta para extraer el fuego eléctrico, en este caso se refiere al gancho, y hay otra parte dispuesta para recibirlo, como pasa con el exterior de la jarra. También decía que si se acerca un objeto con diferente carga o sin carga al gancho se puede ver el fuego eléctrico fluir y lo que hizo fue lo siguiente: primero cargo solo una jarra y acerco la otra en equilibrio, de allí evidencio que cuando hacia esto las dos quedaban con la mitad de la carga. Luego cargó las dos hasta su máxima capacidad y al acercar los ganchos, vio que no se transfería nada, de hecho, los ganchos se repelían, con esta configuración al acercar el gancho de una de ellas con el exterior de la otra jarra sucedía una descarga aun mayor que cuando se tenía la configuración de una sola jarra cargada y otra en equilibrio, además que posteriormente a la descarga, las dos quedaban en equilibrio (The Works of Benjamin Franklin, 1746-1756).

A partir de estos experimentos Franklin concluyó lo siguiente: inicialmente para dar una explicación al comportamiento descrito de las jarras propuso que existen dos cargas “*plus and minus*”, la positiva está situada en la parte metálica es decir en el gancho, y la negativa en la superficie de la botella. Además, afirma que los cuerpos electrificados son repelidos por cualquier objeto igualmente electrificado con el mismo tipo de carga. También describe que la relación de positivo y negativo va con la idea de que cuando sucede la chispa y logra quedar en equilibrio la jarra de Leyden, es porque en una parte hay más que en otra de fuego eléctrico y por eso se ve que fluye, asimismo que el fuego eléctrico fluye de la botella desde el gancho a otros cuerpos y no desde su embace (Franklin, 1746-1756).

Por tanto, la conclusión a la que llega Benjamín Franklin en la que afirma que si dos cuerpos están igualmente cargados (positivo y positivo o negativo y negativo) estos se repelen entre sí, es el caso de los dos ganchos al acercarlos, del mismo modo si son de diferente carga se atraen como el gancho con el cuerpo de la botella, esta conclusión responde al principio universal propuesto por Dufay en 1733 en el que plantea la existencia de dos electricidades distintas Vitreous y Resinous, donde sucedía lo mismo: cuerpos con electricidades iguales se repelen y con distinta se atraen.

Continuando con los experimentos de Franklin, él se planteó la siguiente pregunta ¿Qué relación tiene el relámpago con la electricidad? De allí surgen otro tipo de experimentos: primero estudiando el vapor de agua para ver si presenta algún tipo de carga, a partir de esta premisa llega a observar que al calentar agua el vapor que liberaba sí se encontraba cargado. Esto corresponde con otra de las conclusiones de Dufay donde afirmaba que los cuerpos eléctricos también se podían cargar por calentamiento. Debido a esto, Franklin al analizar al ciclo del agua en la naturaleza, plantea un conjunto de hipótesis e ideas que consisten en lo siguiente: tener un objeto que se acerque a las nubes y se cargue eléctricamente por inducción, y además que se pueda transferir esa carga hasta la mano, se demostraría la relación entre los truenos y los principios eléctricos (Franklin, 1746-1756).

Con base en estas ideas, construye su famoso experimento de la cometa con la llave, el cual consta de lo siguiente: colocaba unas varas de cedro en cruz donde se extendía un pañolón de seda, importante que resistiera a la humedad y que no se rasgase con la tormenta, en la parte superior colocaba una punta afilada metálica de un pie de largo, la cometa estaba sostenida con

cordel de cáñamo hasta que se unía a una tira de seda, antes de la unión se colocaba una llave metálica donde se pretendía ver los fenómenos eléctricos. Él se colocaba bajo un techado y elevaba su cometa en los días de tormenta. El 15 de junio de 1752 logra tener éxito con su experimento y los resultados obtenidos lo llevan a afirmar lo siguiente: “*La llave se cargaba de la misma manera que se hace con experimentos de frotación, pero en este caso por la presencia de las nubes y la tormenta*” (Franklin, 1909). Además, Franklin utilizó este resultado en un beneficio para la humanidad -siempre había contribuido en el desarrollo tecnológico en diferentes áreas y con este resultado no fue la excepción e inventó el pararrayo, ayudando a aquellos lugares donde se presentaban daños por los rayos, pero esta ayuda se concentró más en la navegación, ya que los barcos eran vulnerables a los daños de los rayos y al implementar el pararrayo los viajes en barco se volvieron más seguros (Franklin, 1909).

De este experimento hay importantes conclusiones que resaltar, primero que se logra demostrar la equivalencia entre el “*lightning*” y la electricidad, además, que para tener éxito determina características importantes de diferentes materiales que responde a la siguiente pregunta ¿por qué Franklin unía seda al cáñamo en la parte inferior? Principalmente porque por experiencia y conocimiento, Franklin sabía que la seda no comunica el fuego eléctrico es decir lo aísla con el fin de protegerse de la descarga del cielo y, por otro lado, como ya se había demostrado con anteriores científicos el metal es bueno para comunicar el fuego eléctrico, de allí surgen los conceptos de *Conductor* y de *Aislante* que utilizamos hoy en día.

Ya para terminar, Franklin realiza otro tipo de estudios como, por ejemplo, qué tipo de carga poseen las nubes y con el experimento de las campanas de Franklin, logra determinar que las nubes tienen carga negativa de acuerdo con la descripción de carga positiva y negativa que él había desarrollado. Un estudio más abordado por este científico se da a partir de la pregunta ¿Cuál es la velocidad del fuego eléctrico en un alambre largo? En este aspecto solo llegó a decir que es casi instantáneo sin importar el largo y por último afirma que “*el fuego eléctrico no es visible si no cuando pasa de un cuerpo a otro, y en un alambre es invisible*” (Franklin, 1746-1756).

De esto último, se manifiesta que desde este tiempo se empieza a percibir que el fenómeno de la conducción eléctrica y la electricidad son fenómenos microscópicos, con consecuencias macroscópicas, aludiendo a la pregunta que se ha estado planteando desde el principio del capítulo ¿qué sucede en el interior de un conductor cuando conduce la corriente eléctrica? y ¿qué es la corriente eléctrica?

Para la vida de Benjamín Franklin, su experiencia como científico llegó por interés de querer comprender los fenómenos eléctricos y llevarlos hacia su utilidad. Es evidente que con todo el abordaje experimental que realizó logró el éxito con esto, pero no fue tan fácil encajar en la sociedad científica; en un principio los trabajos realizados por parte de Benjamín Franklin con respecto al estudio y entendimiento de los fenómenos eléctricos no fueron recibidos de la mejor manera en Europa. En la Royal Society no se le atribuía reconocimiento a alguien que en primer lugar no se le consideraba científico y segundo era de Filadelfia, por tanto, alejado de la tradición

científica inglesa. Esto cambió cuando uno de los textos de Sr. Collinson llegó a manos del físico Jean-Antoine Nollet y este le relata los descubrimientos de Franklin al rey Luis XV como historias de fantasía, ya que no creía que fueran ciertas. Debido a esto, el rey manda llamar a Franklin para que le mostrara su experimento de la cometa, Franklin atiende a su llamado y tiene éxito en la demostración, desde este momento las ideas e hipótesis que proponía se tomaron en cuenta para la comunidad científica y es nombrado miembro de la Royal Society en 1756 (Franklin, *The Works of Benjamin Franklin*, 1746-1756).

#### **1.4 Partículas conductoras como medio para explicar la comunicación eléctrica**

Pasaron unos años hasta que otro científico consiguiera tener avances en el entendimiento y descripción de los fenómenos eléctricos. En los años de 1785 y 1786, Charles-Augustin de Coulomb publica su *“Tratado de Física acerca de Electricidad y Magnetismo”* el cual se encuentra dividido en siete Tratados. Uno de los aspectos que aborda detalladamente a lo largo de su escrito es el que muestra el método que utilizó para determinar experimentalmente la ley de las fuerzas eléctricas<sup>4</sup>. (Coulomb, 1785).

Coulomb, en la extensión de su Tratado, presenta diferentes ideas las cuales busca sustentar experimentalmente haciendo uso de su máquina de torsión; para el primer y segundo Tratado se enfoca en dar una explicación detallada en el método que ha utilizado experimentalmente para determinar las leyes de atracción y repulsión en los flujos eléctricos positivo y negativo, y también en los flujos magnéticos. Se logra identificar que Coulomb presenta un dominio en los tipos de materiales, ya que explicita en qué procesos se debe utilizar un conductor y en cuáles un aislante, además de esto, los dota de características particulares como veremos más adelante, como resultado de su estudio postula el siguiente principio: *“Las fuerzas de atracción y repulsión de fluidos magnéticos, al igual que las de fluido eléctrico, son directamente proporcionales a las densidades e inversamente proporcional al cuadrado de las distancias”* (Coulomb, 1785).

En el tercer Tratado Coulomb busca una ley que dé cuenta de la cantidad de electricidad que pierde un cuerpo con cualidad eléctrica en un tiempo dado, dicho cuerpo se encuentra “aislado”, pero estará en contacto con el aire que lo rodea el cual presenta cierta humedad, y también estará sostenido en soportes aislante o como él le llama *idioeléctricos*. Para este proceso Coulomb tiene diferentes consideraciones: primero se cuestiona ¿Cómo se esparce el fluido eléctrico, en una esfera metálica? Ya que él habla de la densidad del fluido eléctrico, otra de las consideraciones que tiene es que no existe un soporte que sea perfectamente aislante en la naturaleza, ya que por cada material idioeléctrico se cede una cierta cantidad de fluido eléctrico. Es por ello por lo que Coulomb empieza a comparar diferentes materiales idioeléctricos con el fin de identificar cual es el mejor aislante entre ellos, compara la goma de laca, el lacre, el vidrio, la pulpa de sauco y la seda.

---

<sup>4</sup> Ley de Coulomb: Atracción y repulsión de las cargas eléctricas.

La forma en que desarrolló el experimento fue la siguiente: primero en el caso donde solo considerara el efecto del aire que rodea a la esfera, con un soporte idioeléctrico constante, para este experimento Coulomb tomaba su máquina de torsión y cargaba las esferas metálicas con igual tipo de fluido eléctrico con el fin de que estuvieran sometidas a una fuerza de repulsión, luego definía una fuerza de torsión en particular la cual utilizaría en todas sus pruebas como punto de partida, en ese instante tomaba la medida de un higrómetro para saber la humedad del aire, luego compara cómo la fuerza iba disminuyendo al trascurrir el tiempo para encontrar alguna relación. En sus conclusiones pone de manifiesto el desconocimiento de la composición del aire, lo que conllevaba a una dificultad de controlar la pureza del aire y también controlar la humedad, ya que esta podía ir variando y no mantenerse constante en una misma prueba o de una prueba a otra.

La segunda parte del experimento consistía en ir variando los soportes idioeléctricos y además ir conectando trozos de hilos de seda de diferentes tamaños en puntos de la superficie de la esfera metálica. Después de las observaciones y toma de datos llega a las siguientes conclusiones: primero la naturaleza de los materiales se puede organizar por el grado del propio material, es decir, en los materiales idioeléctricos hay un porcentaje de “*partículas conductoras*” (Coulomb, 1785, pág. 44), que forman parte de este material, también al tener mayor o menor grado de estas “*partículas*”, el tiempo en el que se da la pérdida de electricidad de la esfera metálica cambia, llegando a postular la idea de “*resistencia del cuerpo*” que consiste en la oposición de la salida del fluido de la esfera y la oposición de dejar fluir la corriente eléctrica, considerando lo anterior Coulomb llega a afirmar algo importante donde da a conocer su concepción de la corriente eléctrica: “*la corriente es cuando la electricidad fluye por el material por las partículas conductoras que posee*” (Coulomb, 1785). Otras conclusiones a las que llega son: en los cuerpos conductores se distribuye el fluido eléctrico libremente, un aislante perfecto haría que el fluido se mantuviera en la esfera para siempre, pero como no existen, es por ello por lo que la esfera va perdiendo la virtud eléctrica, por último, que los cuerpos idioeléctricos requieren de un mayor esfuerzo para cargarse como lo hace un conductor y que por tanto también un mayor tiempo en descargarse (Coulomb, 1785).

Contemplando las ideas y conclusiones de Coulomb, se evidencia el primer acercamiento al concepto de *resistencia eléctrica*, además, que la visión de Coulomb estaba fundamentada en la cosmovisión de Newton y es por esta razón es que existe esa semejanza entre la ley de la fuerza eléctrica y la ley de la fuerza gravitacional. Adicionalmente, esto relaciona que las ideas de Coulomb estén sustentadas bajo el movimiento mecanicista, en el cual se explican en los fenómenos a partir del fundamento corpuscular. En esta medida aun no es concluyente si la corriente eléctrica es el movimiento de partículas o de una sustancia que fluye a través de estas, es decir aún no se conoce con certeza qué es la corriente eléctrica y qué es la conducción eléctrica, pero se asocia a un flujo, el cual de manera específica Coulomb atribuye a unas ciertas partículas que tienen la propiedad de “conducir la electricidad”.

Por último, en el cuarto Tratado, Coulomb pretende probar algunas propiedades de los fluidos eléctricos, estas propiedades que menciona son resultado de los experimentos trabajados a lo

largo del tercer Tratado. La primer propiedad Coulomb la expresa de la siguiente manera: “*El fluido no se dispersa en ningún cuerpo por afinidad química o atractiva selectiva, si no que se distribuye entre diferentes cuerpos en contacto por su sola acción repulsiva*” (Coulomb, 1785). Aquí cabe preguntarse ¿por qué expresa esta propiedad Coulomb? Para llegar a esta idea es importante partir desde las consideraciones que él plantea: El fluido eléctrico no existe en ningún cuerpo y cada material posee un porcentaje de *partículas conductoras* (Coulomb, 1785, pág. 45). Estas partículas permiten la capacidad del cuerpo para aumentar su densidad de fluido eléctrico y este fluye al estar en contacto con un cuerpo electrificado. Antes de que un cuerpo sin electrificar se acerque y toque otro cuerpo electrificado, tendrá sus *partículas conductoras* sin fluido eléctrico; por otro lado, el cuerpo electrificado tendrá sus partículas conductoras distribuidas en todo el cuerpo por la acción repulsiva entre ellas. En el instante en que se acercan un cuerpo electrificado y otro no electrificado y se tocan, las partículas conductoras con fluido eléctrico por la acción repulsiva se redistribuyen en los dos cuerpos es decir van de un cuerpo electrificado al otro, llegando un punto donde los dos cuerpos tengan una misma densidad de fluido. Esta idea de Coulomb tiene un grado de similitud con la visión de Franklin cuando señala que, al tocarse dos botellas de Leyden, se llega a un estado de equilibrio, sin embargo, hay una particularidad en el pensamiento de Coulomb y es pensar que las partículas se encargan de distribuir el fluido eléctrico.

En el caso de dos cuerpos conductores dice Coulomb “*Se necesita un instante de tiempo incalculable para que la electricidad se distribuya por igual entre los dos cuerpos*” y por ello a todos los metales los llama “*Conductores perfectos*” (Coulomb, 1785, pág. 73). Analizando esta parte, aunque Coulomb presente la idea de las partículas conductoras, estas no son lo mismo que el fluido eléctrico, es decir, es como si el fluido eléctrico dependiera de las partículas conductoras para poder fluir de un cuerpo a otro, ya que nos dice Coulomb que la cantidad de partículas conductoras depende del tipo de material y estas no se pueden transferir porque cambiarían las propiedades del mismo material.

Otra de las propiedades que postula Coulomb es: “*En los cuerpos conductores el fluido eléctrico en estado de equilibrio se reparte por la superficie de los cuerpos y no penetra en el interior*”. Para llegar a esta conclusión, Coulomb desarrolla el siguiente experimento, el cual está configurado como se muestra en la ilustración 8:

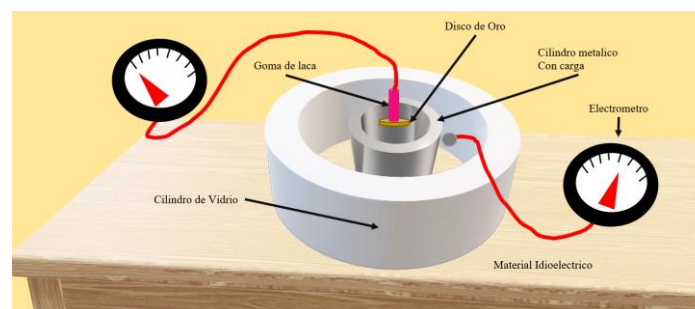


Ilustración 8. Experimento de Charle-Agustín de Coulomb (ilustración Propia)

El experimento consiste en un cilindro metálico con un determinado espesor por el cual se pueda introducir un disco de papel de oro de 0.135 pulgadas de diámetro sin que toque las paredes internas del cilindro. Este cilindro se encuentra sobre un material idioeléctrico, a su vez, este montaje está rodeado por un cilindro de vidrio el cual lo protege de las corrientes de aire. El sistema también cuenta con un electrómetro bastante sensible y un electróforo con el que carga el cilindro metálico. El experimento lo desarrolló de la siguiente manera: utilizando el electrómetro tomaba una medida del cilindro cargado en la superficie exterior y a su vez también tomaba una medida en el interior del cilindro, empleando el electrómetro conectado al disco de papel de oro. Usó puntualmente este material ya que, Coulomb se preparó para que el electrómetro tomara una mínima medida de carga en el interior del cilindro, por lo que el oro es el mejor conductor y por tanto es también el más sensible. De allí observó que el electrómetro solo daba cuenta de la existencia de carga en el exterior del cilindro, mientras que en el interior no existía presencia de carga (Coulomb, 1785).

Para concluir esta sección respecto a las propuestas de Coulomb, es interesante la idea que poseía de conductor perfecto, de aquel con la capacidad de permitir el flujo de la corriente eléctrica instantáneamente, un aspecto similar a los estudios de Benjamín Franklin donde el fluido eléctrico viaja a una velocidad muy alta en los conductores.

Para este tiempo, finales del siglo XVIII, se poseen distintas perspectivas con el objetivo de dar explicación a los fenómenos de la electricidad y que buscan dar respuesta a las preguntas de ¿cuál es la naturaleza de la electricidad? y ¿qué es la conducción eléctrica? Se tiene el paradigma de la electricidad como un fluido (Electrick Effluvia) que puede ser transferido por los conductores y que solo es visible en la chispa, esta idea se fortalece bajo la mirada de físicos como Otto Von Guericke, Stephen Gray, Francois de Cisternay Dufay, Benjamín Franklin y que será tomada por otros físicos tiempo más adelante. También está a disposición la mirada de Pieter Van Musschenbroek con la idea del compuesto eléctrico donde se mezclan distintos materiales y se da la materia eléctrica, esta idea toma relevancia con las ideas de Alessandro Volta un tiempo más adelante. Por último, se tiene la propuesta de Charles-Agustín de Coulomb que consisten que la electricidad es un movimiento de pequeñas partículas conductoras que transportan el fluido eléctrico y que la conducción eléctrica depende de la cantidad de partículas que posea cada material, lo cual muestra que las ideas se ampliaban hacia nuevas formas de explicar la electricidad, pero ninguna se imponía sobre la otra con absoluta superioridad o verificación experimental.

### **1.5 Primera formalización de la corriente eléctrica: la corriente galvánica, la creación de fluido eléctrico y el estudio del desprendimiento de calor en conductores.**

Para el año de 1792 Alessandro Volta seguía de cerca los experimentos y descubrimientos realizados por Luigi Galvani el cual afirmaban la existencia de la *Fuerza Vital* o llamada también *electricidad animal*, lo cual no terminaba de convencer a Volta. Galvani expone estos descubrimientos en su obra llamada *De viribus electricitatis in motu musculari* (*Sobre las*

*fuerzas de la electricidad en el movimiento muscular.*) publicada en 1791 (Picollino & Bresadola, 2013). En este momento se abría la puerta para cuestionar la naturaleza de la electricidad.

Galvani notó que una rana recién muerta, colocada cerca de una maquina eléctrica y de la cual salieran chispas hacia la rana, empezaban a generar contracciones musculares, como anatomista esto le generó gran curiosidad, por lo que realizaría a una serie de experimentos involucrando zancas de rana y la botella de Leyden. Lo que hacía Galvani era, con las zancas de rana acercar por contacto un material conductor como los metales a una Botella de Leyden, y generar movimientos musculares, en este caso para Galvani la electricidad de la botella de Leyden es una *electricidad artificial* ya que la verdadera se encuentra en los músculos, llamada *electricidad animal* o *fluido Vital*.

Otro de los aspectos que también descubrió Galvani fue que no era necesaria la botella de Leyden para generar estos estímulos, sino que era suficiente con acercar un metal y tocar en un determinado punto de los nervios de las zancas de rana, en este caso sí se evidenciaba la *electricidad natural*, y para médicos y fisiólogos se consideraba como el secreto de la vida. (Picollino & Bresadola, 2013)



*Ilustración 9: The experimento of Galvani the metallic (Piccolino & Bresadola , 2013)*

Alessandro Volta al seguir de cerca los descubrimientos de Galvani, y además de replicarlos le pone mayor atención a ciertas afirmaciones que él planteó es sus escritos, como por ejemplo que la electricidad animal está contenida en los músculos, esto lo lleva a desarrollar la siguiente idea: si al tocar un nervio con un metal como el latón el cual utilizaba Galvani, provocaba que la electricidad animal viajara desde el músculo hasta el nervio para generar el estímulo muscular, Volta lo compara con la botella de Leyden donde los nervios serían la parte negativa y los músculos la parte positiva. Ya que, en la botella de Leyden, como lo explicaba Benjamín Franklin, la corriente eléctrica fluye desde donde se encuentra el fluido eléctrico hasta donde no lo hay. (Volta, Investigaciones Sobre el Galvanismo, 1796-1800)

Continuando con las descripciones de Galvani en sus estudios, él afirma que dependiendo del tipo de metal que se utilice en los experimentos para realizar el contacto, la electricidad animal se va perdiendo en mayor o menor medida, hasta el punto donde no quede vitalidad en el cuerpo amputado. Teniendo en cuenta este aspecto Galvani caracteriza a los metales dependiendo sus efectos. De este modo Galvani para aquellos metales que retardan más la pérdida de electricidad animal, los denomina como *menos conductores* ya que retardan el flujo de la fuerza vital, por

otro lado, están los *conductores*, con los cuales es mucho más rápido el flujo, ya que la pérdida de la fuerza vital es más rápida (Volta, Investigaciones Sobre el Galvanismo, 1796-1800).

Volta al hacer los análisis de los experimentos realizados, identifica aspectos que no son del todo convincentes como, por ejemplo: las zancas requieren de electricidad para moverse, entonces ¿qué es lo que genera el latón cuando las toca? Porque si la *electricidad* está almacenada en los músculos no fluiría al latón para generar movimiento sino al contrario por lo que debe haber algo más que este sucediendo para que se den estos movimientos. Por otro lado, Volta también analiza la electricidad muscular contenida en los músculos y lo asemeja a una botella de Leyden, pero sucede que al acercarlo a un electrómetro bastante sensible no se percibe ningún efecto ya que no se detecta ningún movimiento, por lo que concluye que no hay electricidad contenida, sino que debe estar pasando algo diferente. (Volta, Tratado sobre la Electricidad Animal, 1792)

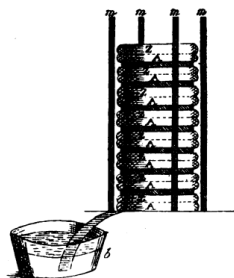
Bajo este desacuerdo de la existencia de la electricidad animal de Galvani, Volta se dedicó a analizar este aspecto más detalladamente, como consecuencia de estos estudios surge una de las ideas más importantes de Volta, llamada por él cómo la *electricidad por contacto*, donde menciona que los conductores húmedos al estar en contacto excitan al fluido eléctrico. Esta sería la teoría que entraría en controversia con la *electricidad galvánica* o *electricidad animal*, para generar esta electricidad se debe cumplir ciertas condiciones: El contacto debe ser entre dos tipos de metales distintos que adicionalmente se encuentren humedecidos lo que generaría el fluido eléctrico. Volta tras estudiar los experimentos de Galvani y poner a prueba sus ideas, dedujo que los efectos de las contracciones en las zancas de rana son generados por el contacto de dos metales diferentes, es por esta razón que Galvani requería de un metal en específico para generar este tipo de movimientos, por lo que Volta concluye lo siguiente:

*“Todos los cuerpos ya sean animales, vegetales o minerales, tan pronto como se les priva completamente de su humedad, se vuelven idioeléctricos, en consecuencia, por frotamiento capaces de dar fenómenos eléctricos. Excepto solo los metales que son esencialmente conductores perfectos y aneléctricos.”* (Volta, 1792)

Continuando con sus estudios Volta investigó qué combinaciones de metales generaban electricidad; probó las combinaciones de plata con zinc, cobre y plata, estaño y zinc, cobre con zinc, de donde elegiría la combinación de plata con zinc para continuar con sus experimentos ya que obtenía mejores resultados. Por otro lado, para mantenerlos humedecidos, ya fuera de agua salada o lejía, utilizaba trozos de cartón o de cuero. Para Volta lo que sucede al generar la electricidad es que se excita el fluido eléctrico y se crea *materia eléctrica*, es por ello por lo que cuando se seca la configuración se deja de generar corriente eléctrica y se debe nuevamente volver a humedecer hasta que los metales estén en condiciones óptimas. (Volta, 1792)

Volta logra construir su invento en una forma de columna intercalando metales, como se muestra en la Ilustración 10. Es de suma importancia mantener la configuración para que se genere la electricidad, de lo cual Volta afirma que *“este nuevo instrumento se da una acción constante de fluidez”* (Volta, 1792), por lo que logra imitar los efectos de la Botella de Leyden, en este caso

siendo menos intensa pero más perdurable, un aspecto muy importante que va a permitir a futuros físicos estudiar más aspectos de la corriente eléctrica y la conducción eléctrica.



*Ilustración 10: Instrumento de Volta para generar corriente por contacto (Volta, 1792, pág. 87)*

El descubrimiento de la Columna de Volta o Cadena Galvánica fue un aporte de gran utilidad para la ciencia, ya que sirvió para que distintos científicos la usaran en sus experimentos sobre la electricidad, adicionalmente, algunos científicos también se dedicaron a estudiar su funcionamiento entre los que tenemos los experimentos de Becquerol, Barlow, Ampere, Oesterd, Faraday, Davy y el Dr. Georg Simón Ohm. Puntualmente en el año de 1827 en Berlín, Ohm publica el texto llamado “*La cadena galvánica, Procesada Matemáticamente*” en el cual busca dar una explicación a los fenómenos eléctricos de la electricidad galvánica, ya que para él es importante obtener un conocimiento más preciso frente a esto. El texto se encuentra dividido en tres grandes apartados: *Estudios generales sobre la difusión de la electricidad*, *Fenómenos electroscopicos* y *El poder químico de la cadena galvánica*. El objetivo de Ohm es llegar a determinar matemáticamente la distribución eléctrica de la cadena galvánica, la *fuerza electroscópica*<sup>5</sup> entre sus extremos y también los efectos químicos con respecto a la corriente eléctrica.

La cadena galvánica es un conjunto de partes prismáticas formadas por dos metales y un líquido que los recubre, el conjunto puede ser homogéneo con una serie de secciones con los mismos metales o heterogéneo con secciones de distintos metales. Coulomb en su trabajo representa geométricamente a la cadena galvánica, como se muestra en la Ilustración 11a.

---

<sup>5</sup> Para poder seguir de forma completamente específica los cambios que se producen en las propiedades eléctricas de un cuerpo, Ohm hizo uso en sus experimentos del *electroscopio*, un instrumento para medir la carga eléctrica en los cuerpos es por esta razón que utiliza el termino de fuerza electroscópica para referirse a tales efectos.

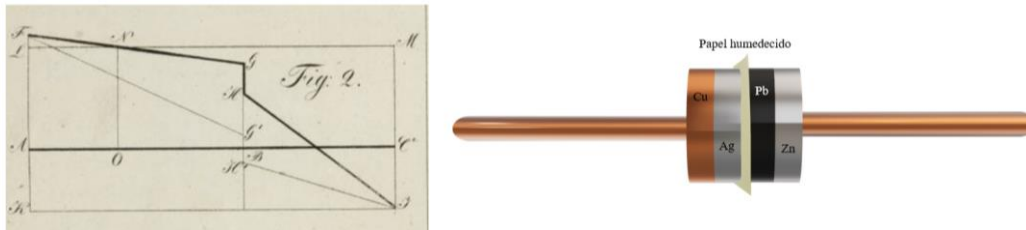


Ilustración 11 a: Representación geométrica por Ohm para una cadena Galvánica heterogénea de dos secciones (Ohm, 1827). b. Cadena galvánica de dos secciones (Ilustración propia)

Para Ohm la electricidad se evidencia de distintas maneras dependiendo las circunstancias, una de ellas es en los cuerpos eléctricos cuando están cargados, ya que estos se repelen o se atraen, pero hay otras relacionadas con otros fenómenos físicos como el calor, la luz, la química y el magnetismo. En su texto caracteriza la electricidad en dos tipos distintos: “*La electricidad ligada a los cuerpos*” y “*La electricidad libre*”. Él se refiere con la electricidad libre como aquella que fluye por los cuerpos conductores gracias a las partículas conductoras que poseen, donde menciona que: “*Es tan poco conocido el tamaño, la forma, la naturaleza que forman las partículas conductoras del cuerpo que actúan entre sí*” (Ohm, 1827), señalando que no hay conocimiento preciso respecto a lo que son las partículas conductoras, sin embargo, al llamarlas de esta forma se puede notar una similitud en el término que utiliza para definir lo que permite la conducción en el material con las ideas de Coulomb, pero dándoles una categoría diferente ya que Ohm no las relaciona como portadoras del fluido eléctrico. Por su parte, la electricidad que está ligada a los cuerpos, es aquella que está en un estado de excitación y se produce por la reacción química generando materia eléctrica, a lo que Ohm afirma lo siguiente:

*“El movimiento de la electricidad dentro de la mayoría de los cuerpos ocurre tan rápidamente que rara vez podemos notar sus cambios en diferentes lugares y por lo tanto probablemente no podemos determinar la ley para la cual se rige por la experiencia”*  
(Ohm, 1827)

Al realizar el estudio de la cadena galvánica Ohm enuncia consideraciones muy importantes para tener en cuenta, que le ayudarán a realizar sus análisis. Menciona que el aparato galvánico se caracteriza por tener el movimiento eléctrico en una sola dirección, además, que posee una independencia con el tiempo ya que, su funcionamiento se mantiene durante mucho más tiempo en comparación con la botella de Leyden.

Además, la comunicación eléctrica consiste en la interacción eléctrica de un elemento a otro más cercano y esta es proporcional a la diferencia de las fuerzas eléctricas entre los dos elementos, esta idea es análoga a la teoría propuesta por Fourier (1822) en la que el flujo de calor es proporcional a la diferencia de temperaturas. Por tanto, es notable que fue de gran influencia la teoría del calor en el pensamiento de Ohm, para que pudiera construir su teoría sobre la cadena Galvánica, donde buscaba demostrar la similitud entre la corriente eléctrica y el calor señalando

que: “Si más adelante se descubriera mediante experimento que los cuerpos se comportan frente a la electricidad de manera similar a lo que llamamos capacidad del cuerpo para calentarse”. (Ohm, 1827) , esta última parte Ohm la afirma en un principio porque las ecuaciones diferenciales a las que llega son similares a las de Fourier y Poisson para el movimiento térmico, además considera que los coeficientes entre conducción eléctrica y térmica están relacionados, pero es consciente de las limitaciones experimentales que se le presentan para demostrar tal relación.

Una de las preguntas que buscaba responder Ohm en sus estudios es ¿cómo determinar la capacidad de conducción de los cuerpos? Esta pregunta va en contra de lo propuesto por Coulomb que decía que todos los metales eran conductores perfectos, pero para Ohm los metales poseían un coeficiente de conductividad que se manifestaba de manera diferente en los experimentos de la cadena galvánica. Es así como realizó experimentos cambiando una sección de la cadena galvánica por distintos metales, los cuales poseían las mismas características de longitud y sección transversal, con esto observó que el comportamiento de la corriente era distinto. Dados estos resultados determinó el factor de conductividad de distintos metales, estos experimentos los presentó Ohm en un anuario suizo en el año de 1826 llamado *Schweiggers Jahrbuch* (Ohm, 1827, pág. 37).

Un aspecto que le faltaba completar a Coulomb, según Ohm, es con respecto al comportamiento de la electricidad de cuando se encuentra almacenada a cuando esta fluye por los cuerpos, ya que Ohm está de acuerdo con la idea de Coulomb que dice “la electricidad se encuentra almacenada en los cuerpos en la superficie y penetra en el cuerpo a una profundidad imperceptible” (Ohm, 1827), pero adiciona que cuando la corriente eléctrica fluye por los cuerpos, esta lo hace a través de toda la masa del cuerpo.

En el transcurso del texto Ohm menciona que son suficientes dos ecuaciones para poder describir todos los fenómenos eléctricos de la cadena galvánica: La ecuación de la magnitud de la corriente eléctrica y la ecuación de la fuerza eléctrica, las cuales relaciona de la siguiente forma:

Ecuación de Magnitud de la corriente eléctrica:

$$S = \omega \chi \frac{du}{dy} \tag{Ecuación 1}$$

Donde  $S$  es la magnitud de la corriente eléctrica,  $\chi$  es el factor de conductividad correspondiente al material y  $\omega$  es la sección transversal y el factor  $\frac{du}{dy}$  corresponde a cómo varía la fuerza electroscópica a lo largo de la cadena galvánica. Tras seguir un proceso matemático Ohm llega a la siguiente expresión

$$S = \frac{A}{L} \tag{Ecuación 2}$$

Donde  $A$  es la suma de todos los voltajes en la cadena, conceptualmente se refiere a la suma de las diferencias de fuerzas electroscópicas en todas las secciones, o también se puede referir como una tensión eléctrica en un estado de excitación en el que existe un desequilibrio entre las fuerzas electroscópicas; y  $L$  es la suma de las longitudes reducidas de la cadena.

Describiendo la ecuación, esta dice lo siguiente: la magnitud de la corriente en una cadena galvánica es directamente proporcional a la suma de todos los voltajes e inversamente proporcional a toda longitud reducida de la cadena. Donde  $L$  es la suma de los cocientes de las longitudes reales ( $x$ ) y el producto de la conductividad y la sección transversal

$$L = \frac{x}{\chi\omega} \quad \text{Ecuación 3}$$

Remplazando la ecuación (3) en (2) tenemos:

$$S = \frac{A\chi\omega}{x} \quad \text{Ecuación 4}$$

Si se toma esta última expresión y se compara con la ley de Ohm que se conoce en la actualidad, se pueden deducir sus relaciones y se establece que la intensidad de corriente en un circuito eléctrico es directamente proporcional al voltaje e inversamente proporcional a la resistencia, por lo tanto, se tendría que  $I = S$ ,  $V = A$  y  $R = \frac{x}{\chi\omega}$ . Donde se encuentra que la resistencia de un cuerpo se comportaría directamente proporcional a su longitud, es decir entre más largo un conductor mayor es su resistencia e inversamente proporcional a su conductividad y su sección transversal, por lo que, para un conductor entre mejor sea su conductividad menor será la resistencia que presenta al paso de la corriente. Es claro que la ecuación (2) es la esencia de la ley de Ohm que se utiliza actualmente para los circuitos eléctricos.

Continuando con la ecuación de la fuerza electroscópica:

$$\gamma \frac{du}{dt} = \chi \frac{d^2u}{dx^2} - \frac{bc}{\omega} u \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde la fuerza eléctrica  $u$  en la cadena galvánica es una función que depende de  $t$  y de  $x$ , es decir  $u(t, x)$ . En el lado izquierdo de la expresión se tiene un coeficiente  $\gamma$  que Ohm describe como: “*dada la diferencia entre cuerpos del mismo tamaño al tener cambios diferentes en su potencia electroscópica y la misma cantidad de electricidad se añade este coeficiente que mide esa peculiaridad*”<sup>6</sup> (Ohm, 1827). También está el factor que corresponde a cómo varía la fuerza eléctrica con respecto al tiempo. Continuando el análisis con el lado derecho de la ecuación, el

---

<sup>6</sup> El fenómeno de la cadena galvánica Ohm lo divide en dos momentos, un primer momento donde se conecta y pasa por unos procesos químicos donde la fuerza electroscópica no es constante y un segundo momento donde la fuerza electroscópica se mantiene llamado por él como estado permanente. Antes de llegar al segundo momento, si la cadena galvánica es heterogénea existirá una diferencia entre el valor eléctrico de los metales utilizado en las secciones, es por ello que Ohm introduce este coeficiente para medir dicha diferencia y que le permita tener un valor de la fuerza mientras esta variando.

primer factor tiene un coeficiente  $\chi$  que en este caso es la conductividad absoluta, es decir, la capacidad del cuerpo independiente de la sección, multiplicado por el factor de cómo varía la fuerza eléctrica con respecto a la posición en la cadena galvánica y por último un tercer factor que corresponde con la pérdida de electricidad a través del aire, donde el coeficiente  $b$  está en relación con las propiedades del aire que rodea la cadena galvánica, y  $c$  es la circunferencia de la cadena galvánica.

Para poder solucionar esta ecuación se realizan las siguientes consideraciones: Ya que después de un tiempo la cadena galvánica entra en un *estado permanente* en el que la fuerza eléctrica no cambia, se puede caracterizar el comportamiento de la fuerza eléctrica en la cadena galvánica en dos partes: una en la que la fuerza cambia hasta llegar a su estado permanente y la otra cuando se encuentra en el estado permanente. Entonces en esta segunda parte se tiene que  $\frac{du}{dt} = 0$ , reemplazando en la ecuación 5:

$$0 = \chi \frac{d^2u}{dx^2} - \frac{bc}{\omega} u \quad \text{Ecuación 6}$$

Dada la poca influencia que existe por la pérdida de electricidad a través del aire de la cadena galvánica esta se podría considerar despreciable, ya que la ley experimental de Coulomb dice lo siguiente: “*la pérdida de electricidad de un cuerpo rodeado de aire en un periodo de tiempo es proporcional a la intensidad de la electricidad y un coeficiente que depende de la naturaleza del aire*” (Coulomb, 1785), entonces dada la baja conductividad del aire, una pérdida significativa se daría en tiempos muy prolongados como en los experimentos de Coulomb, adicionalmente ya que las cadenas galvánicas no manejan intensidades de electricidad tan fuertes la proporción sería mínima, por lo tanto en ciertas condiciones el factor se puede omitir en la ecuación quedando:

$$0 = \frac{d^2u}{dx^2} \quad \text{Ecuación 7}$$

Solucionando se tiene que:  $u = fx + k$

Luego de un proceso matemático donde se determina la constante  $f$  se obtiene:

$$u = \frac{A}{L} x + k \quad \text{Ecuación 8}$$

Describiendo la ecuación se establece que, la fuerza eléctrica para una cadena Galvánica compuesta de varias partes, que se encuentra en su estado permanente y adicionalmente no sufre ningún efecto del aire que la rodea, depende de la distribución de la corriente eléctrica a lo largo de la cadena más una constante  $k$ , donde para esta constante Ohm afirma lo siguiente: “*generalmente permanece completamente indeterminada lo que significa que la distribución de la electricidad en el conductor cambie según mediante influencias externas de una manera que afecte a toda la cadena por igual en todas partes*”. Con lo que se puede concluir que esta  $k$

corresponde a una fuerza que se le aplica a la cadena al tener contacto con un objeto externo que hace que se genere una variación eléctrica en toda la cadena galvánica (Ohm, 1827).

Tras realizar su estudio y llegar a las ecuaciones, Ohm describe algunas de las conclusiones más importantes sobre los fenómenos de la corriente en la cadena galvánica:

- La corriente eléctrica al fluir por la cadena galvánica es igual en todos los puntos, incluso si existe una variación de la corriente que modifique su intensidad, esta variará en toda la cadena.
- La corriente en una cadena galvánica permanece sin cambios, si la suma de todos sus voltajes y longitudes reducidas total no cambian en absoluto o cambian en la misma proporción.
- Si en cualquier punto de la cadena se causa un cambio en su estado eléctrico, todos los demás puntos de la cadena cambian el suyo al mismo tiempo y en la misma cantidad.
- La fuerza electroscópica de dicha cadena cambia constantemente a lo largo de toda la longitud del conductor y siempre es la misma cantidad en la misma distancia, solo donde sus extremos se tocan cambian permanentemente de un extremo al otro por toda la tensión.
- En una cadena formada del orden cobre, plata, plomo, zinc y el líquido, la corriente permanece sin cambios incluso si la plata y el plomo intercambian de posiciones entre si ya que no cambian la suma de voltajes. Se resalta esta conclusión porque demuestra una característica propia de los circuitos eléctricos en serie, además, de reconocer que Ohm en sus experimentos logra caracterizar propiedades no solo de los circuitos en serie sino también de los circuitos en paralelos y cómo se distribuye la corriente eléctrica en estos.

Haciendo un breve repaso tenemos que la corriente eléctrica fluye por los conductores gracias a las partículas conductoras que estos poseen, Coulomb decía que todos los metales son conductores perfectos, pero este punto de vista solo estaba incompleto ya que Ohm demuestra que cada conductor posee características distintas que le permiten dejar fluir la corriente eléctrica con mayor o menor intensidad, es por esta razón que Ohm logra caracterizar a los conductores por la capacidad de conducción que estos poseen. Por otro lado, Coulomb señala que dada las características de los aislantes estos no dejan fluir la corriente eléctrica a través de ellos o que la dejan fluir en muy poca medida, denominando aquello como la *resistencia del cuerpo*.

Algo interesante es que el concepto de *resistencia* ya había sido utilizado por otra persona antes de los experimentos de Coulomb. Dicha persona es Henry Cavendish que en el año de 1781 se caracterizó por realizar distintos experimentos con la Jarra de Leyden. Cavendish consideraba la *resistencia* como una fuerza que resiste la corriente, además con la capacidad de variar la corriente eléctrica. No es muy conocido su trabajo porque las conclusiones que presentó carecían de demostración experimental debido a las limitaciones propias de la jarra de Leyden y las dificultades para tomar distintas medidas de la corriente eléctrica, pero Cavendish llegó a conclusiones como la siguiente:

*“Cuando se electrifica una jarra y se hacía varios circuitos diferentes entre su lado positivo y su lado negativo, necesariamente pasaría algo de la electricidad por cada uno de ellos, pero necesariamente pasara una cantidad mayor por aquellas en los que se encuentre menos resistencia que aquel en que se encuentra más” (Mass, 1891).*

Este concepto de resistencia eléctrica tomaría un papel más importante en las futuras investigaciones en el campo de los fenómenos de la corriente eléctrica, ya que es más conveniente hablar de la resistencia eléctrica de los cuerpos que de la capacidad de conducción, haciendo hincapié en las ecuaciones de Ohm.

A si mismo otro de los factores que influyó en las posteriores investigaciones es uno de los que Ohm se había referido con anterioridad, donde menciona que en algún momento se podría demostrar la relación existente entre los fenómenos eléctricos y los fenómenos calóricos, y es precisamente con el estudio realizado por el Físico experimental que entrelaza estos dos aspectos. En 1840 James Prescott Joule presenta a través de un manuscrito que envía a la Royal Society su trabajo llamado: *On the heat evolved by Metallic conductors of the electricity, and in the cells of a Battery during electrolysis.* (Sobre el calor que se desprende de los conductores metálicos de la electricidad, y en las células de una batería durante la electrolisis), donde menciona que *“Hay pocos hechos en la ciencia más interesantes que aquellos que establecen una conexión entre el calor y la electricidad”* (Joule, 1840), por lo que una parte del estudio se concentra en la investigación del calor producido por la acción voltaica.

Antes de que Joule realizara esta investigación ya otros científicos habían investigado sobre este tema, encontrando que existe una relación directa con la resistencia del conductor y los efectos de calentamiento, pero nadie había logrado describir una expresión completa del fenómeno o qué otras implicaciones físicas estaban involucradas, es por ello por lo que Joule deseaba saber si la resistencia a la conducción era la única causa de los efectos de calentamiento o si existían otros para poder así consolidar una ley general para describir dicho fenómeno.



*Ilustración 12: Experimento realizado por Joule en 1840. A) Bobina de alambre en un tubo de vidrio. B) Frasco de Vidrio y T) el termómetro. (Joule, 1840)*

Uno de los experimentos que relata Joule a lo largo de su manuscrito es mostrado en la ilustración 12, consiste en un recipiente de vidrio que contiene agua, se sumerge en el agua un termómetro bastante sensible, además de una bobina enrollada en un tubo de cristal de un metal determinado, en sus extremos se conectaban en serie un galvanómetro y la batería. Es importante

que el galvanómetro sea lo bastante sensible y se encuentre bien graduado ya que es esencial para marcar la cantidad definida de electricidad, donde dicho galvanómetro es una construcción propia de Joule como también las baterías que utiliza.

En las condiciones iniciales del experimento es preciso que la temperatura del agua y la temperatura de la habitación sean la misma, se toma una medida inicial de volumen de agua, se mide el largo y espesor del alambre que se utiliza en la bobina, se conecta la batería y se toma la medida de la corriente. Es allí donde comienza la prueba del experimento, se empieza a tomar el tiempo con relación al comportamiento de cómo varía la temperatura del agua.

En una primera prueba experimental comparó dos alambres de cobre, con la única variable de que uno era más grueso que el otro y se percató de que al cabo de un mismo tiempo en el caso del alambre delgado el agua había subido más su temperatura. Luego realizó el mismo experimento con un alambre de hierro con el mismo largo y cuyo espesor se acercaba al del alambre delgado de cobre, el resultado fue que el agua con el del hierro subió más su temperatura, en este caso donde la resistencia eléctrica del hierro es mayor que la del cobre. Con este primer resultado realiza varios experimentos probando con materiales de distintas resistencias y Joule concluye lo siguiente:

*“Cuando una cantidad dada de electricidad voltaica pasa a través de un conductor metálico durante un periodo de tiempo determinado, la cantidad de calor desprendido por él es siempre proporcional a la resistencia que este presenta, cualquiera que sea su valor, la longitud, espesor, forma o tipo de conductor metálico”* (Joule, 1840)

Para la segunda parte del experimento, en este caso decide probar con distintas intensidades de corriente, es decir cambiando las baterías utilizadas, es aquí cuando construye diseños de baterías de distintos físicos como de Mr. Grove, Prof. Daniell, Mr. Sturgeon y Mr. Smee y realiza el experimento con estas baterías, dada la dificultad de controlar la temperatura de la habitación no podía realizar el experimento en tiempos muy largos, pero no fue impedimento para llegar a buenos resultados. Tras probar con distintas intensidades de corriente y comparar los resultados, Joule agrega lo siguiente: *“Cuando una corriente de electricidad voltaica se propaga a lo largo de un conductor metálico, el calor desprendido en un tiempo dado es proporcional a la resistencia del conductor multiplicada por el cuadrado de la intensidad”* (Joule, 1840)

Construyendo la expresión de Joule tenemos lo siguiente:

$$Q = R I^2 t$$

*Ecuación 9*

Donde  $Q$  es el calor desprendido,  $I$  la intensidad de la corriente,  $t$  el tiempo que ha estado conectado a la batería y recordar que  $R$  esta determinada por las características propias del conductor y que es inversamente proporcional a la capacidad conductora que nos hablaba Ohm. Es interesante que en aquel primer experimento donde Joule compara un alambre grueso y otro delgado del mismo metal, con el mismo largo, posea más resistencia el alambre delgado, pero si

se analiza desde las ideas de Coulomb y Ohm se debe a que, al poseer menos masa, posee menos partículas conductoras por lo que su capacidad conductora será menor que el alambre grueso. Por otro lado, el calor desprendido que se describe en la ecuación 9, es a lo hoy en día, se describe como la pérdida de energía en los circuitos eléctricos, ya que es algo inevitable porque todos los materiales poseen una resistencia al paso de la corriente.

Por tanto, hasta este momento se ha realizado una caracterización respecto a los materiales, estableciendo diferentes tipos de interacción con la electricidad. Existen materiales que permiten generar electricidad mediante frotamiento y los que no. También se demuestra la existencia de materiales que presentan diferente capacidad para el paso “libre” de la corriente y en contraste los que no lo permiten. Señalando que este aspecto de la conducción eléctrica es sobre el cual se enfocan las investigaciones desarrolladas hasta el momento, además, se logra determinar que no son conductores perfectos como se creía inicialmente, sino que presentan resistencia al paso de la corriente. Este último aspecto se resalta ya que, es por esta condición que se generan efectos de desprendimiento de calor, con lo cual, se logra estructurar que la resistencia es propia del material y tiene implicaciones al paso de la corriente, lo que genera un mayor o menor flujo y distintas respuestas al aumento de la temperatura.

Hasta aquí los estudios avanzan de manera rápida en estos siglos y se recopila una gran cantidad de experimentos para dar cuenta de lo que es la conducción y cómo se puede generar mejores dispositivos que permitan la generación de corriente eléctrica, pero aún no se logra definir lo que es la corriente eléctrica, y parte de esta descripción tendrá que esperar aún más tiempo para ser develada por los científicos en los siguientes siglos.

## **CAPÍTULO 2: DE LA ELECTRICIDAD A LA IDEA DEL ELECTRÓN EN EL CONCEPTO DE CORRIENTE ELÉCTRICA**

La naturaleza de la corriente eléctrica se volvió un tema recurrente para distintos físicos a comienzos del siglo XIX, los cuales buscaban la forma de descubrir qué es lo que sucede en el interior de un conductor. Pero dada las limitaciones experimentales no se había logrado determinar con precisión qué es a lo que se referían con el flujo eléctrico, es por esta razón que surgieron diferentes modelos teóricos que buscaban darle una descripción a los fenómenos eléctricos. En el año de 1873 se publica uno de los trabajos más importantes del siglo XIX con el nombre de *A treatise on electricity and magnetism* (Tratado sobre electricidad y magnetismo), elaborado por el físico James Clerk Maxwell. Uno de los aspectos de este trabajo, es que Maxwell recoge todas aquellas teorías y leyes que habían sido propuestas de los fenómenos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos para realizar un tratado matemático y medible.

### **2.1 Maxwell y el estudio de las consecuencias de los modelos teóricos de corriente eléctrica.**

Maxwell a lo largo del Tratado no busca dar una definición certera o una caracterización de qué es la corriente eléctrica, cómo funciona un conductor o qué es la resistencia eléctrica, ya que para él mismo este conocimiento está fuera de su alcance. Lo que hace Maxwell en su Tratado es describir las distintas posturas respecto a la corriente y las analiza desde un punto de vista matemático y físico, para poder así demostrar cuál de estas se acerca más a una posible descripción en los fenómenos relacionados con la corriente eléctrica. Entonces para la pregunta de *¿qué es la electricidad?* se tiene un conjunto de propuestas de solución descritas a lo largo de la historia: se habla de la electricidad como una sustancia, como dos sustancias, como el movimiento de partículas, como el movimiento de moléculas cargadas o como una forma de energía. Es decir que, para este momento a pesar de conocer cómo se comporta la corriente y tener matemática y experimentalmente la forma en que la corriente fluye en los circuitos, no había una idea unificada y experimentalmente verificada de la naturaleza de la corriente.

La electricidad como una sustancia representa una de las ideas más antiguas que buscan describir los fenómenos de la corriente eléctrica, desde el año de 1672 cuando Otto Von Guericke lo menciona por primera vez. Concebir la electricidad como un fluido lo dota de características como, poder ser transferida y de fluir por los materiales, pero no con todas las propiedades de un fluido mecánico como la inercia, el peso, la elasticidad o viscosidad; con respecto a esto Maxwell afirma que no son atributos que le permitan a la electricidad ser tratada matemáticamente (Maxwell, 1873). Con la propiedad que si está de acuerdo para su descripción, es tratarla como un fluido incompresible que viaja por los conductores, sin embargo, de nuevo esta idea se muestra como un limitante dado que no concuerda con la teoría de la polarización

eléctrica de algunos materiales, ya que en este fenómeno no es necesario que se transmita electricidad de un material a otro para que los efectos eléctricos sean evidenciados.

En la búsqueda para superar estas limitaciones sobre la idea de la electricidad como un fluido, se establece una línea de trabajo para describirlo a través de una concepción sobre la cual se genera un efecto a “*distancia*”, lo cual desencadena que más adelante en la historia evolucione en una idea mucho más compleja, conocida por algunos físicos como el éter electromagnético; de esta manera es como lo menciona José Manuel Sanchez Ron en su texto *J.J Thomson y la Genesis del descubrimiento del electrón*, donde se establece que la conducción de corriente eléctrica es dada por el subsiguiente flujo del éter electromagnético a lo largo de un conductor. (Sánchez Ron, 1997).

En otro modelo teórico para describir la electricidad, se establece que está se caracteriza por dos fluidos diferentes. Es François de Cisternay Dufay en el año de 1733 quien menciona este principio universal por primera vez con su afirmación de la existencia de la Electricidad Vítreo y Electricidad Resinosa. Un tiempo más adelante cambiaría para describirse como un fluido con carga positiva y un fluido con carga negativa, esta concepción, dice Maxwell en su Tratado, le permite una mejor facilidad para realizar un tratamiento algebraico, además de definir la electricidad como una cantidad física.

Por otro lado, Weber también presenta una concepción de la electricidad como dos fluidos que se mueven en direcciones opuestas y se cancelan entre sí, esto en relación a su idea de la existencia de la *electricidad libre* y de la *electricidad combinada*, es decir cuando existe una diferencia de electricidad entre dos puntos, con electricidad positiva y electricidad negativa, estas se mueven para converger y se anulan entre si generando la electricidad combinada. En esta descripción del fenómeno de la corriente eléctrica, mientras exista este desequilibrio existirá una corriente constante, como en el caso de las baterías voltaicas, por otro lado, cuando un cuerpo se encuentra con una carga ya sea positiva o negativa, este posee electricidad libre y en el momento que se acerque otro cuerpo esta fluirá libremente como en el caso de la chispa eléctrica<sup>7</sup>. Con respecto a la idea de Weber, Maxwell difiere en que la electricidad combinada no presenta propiedades observables, por lo que no se podría demostrar su existencia, y además que al concebir los fluidos que se mueven en direcciones opuestas, estaría en contra de los estudios realizados por Ohm, donde demostró que la electricidad se mueve en una sola dirección (Maxwell, 1873).

Otra de aquellas ideas que surgieron para poder describir el fenómeno de la corriente eléctrica, es la existencia de partículas conductoras, una idea propuesta por Coulomb en el año de 1785. Consiste en que las partículas funcionan como un medio que le permite al fluido eléctrico fluir

---

<sup>7</sup> Maxwell define el fenómeno de la chispa eléctrica de la siguiente manera: es una descarga entre dos cuerpos cargados donde toda la electrificación se descarga de una vez, y la chispa eléctrica comienza en el punto donde la tensión eléctrica supera el aislamiento del dieléctrico.

por los materiales, es importante destacar que desde esta mirada Coulomb caracteriza los distintos materiales por la cantidad de partículas conductoras que estos poseen, afirmando que los que poseen más partículas son conductores perfectos y los que carecen de partículas conductoras son aislantes. Importante reconocer en este punto, que para Coulomb la cantidad de partículas permanece constante en cada tipo de material y estas no pasaban de material a material, lo único que se transfiere es el fluido eléctrico. Un tiempo más adelante Ohm modificaría la idea de Coulomb de conductor, ya que él logra caracterizarlos llegando a concluir que estos poseen distintos grados de conducción, de esta forma se llega a una de las afirmaciones que dice Maxwell en su tratado: “*todas las sustancias resisten el paso de la electricidad y todas las sustancias lo permiten, aunque en grados muy diferentes*” (Maxwell, 1873).

Esta como las otras ideas cambiaría con el tiempo, como consecuencia de los estudios de la batería galvánica y la teoría de la creación de materia eléctrica, en esta idea se apartó el concepto del fluido eléctrico y se enfocó más en las partículas que se *creaban*, donde ya no serían un solo tipo de partículas, sino dos tipos diferentes: positivas y negativas. Estas partículas se mueven repeliéndose entre sí cumpliendo con la ley de Coulomb, incluso tal vez podrían poseer masa, pero que es tan pequeña que no modifica la masa del cuerpo. Con relación a lo anterior Clausius afirma lo siguiente: “*Cuando una fuerza electromotriz actúa sobre un líquido, genera que las moléculas cargadas positivamente se dirijan hacia el cátodo y las negativas en sentido contrario*”. Al analizar esta expresión se encuentra que existe un cambio de término de partícula a molécula, ya que estas se crean en el proceso pero que poseen el mismo comportamiento. Incluso es preciso resaltar que se refiere a la conducción eléctrica en los líquidos, ya que la conducción en los líquidos produce cambios en la sustancia, a diferencia que en los sólidos estos no cambian en lo absoluto, y en la conducción existe un movimiento compuesto de dos tipos de moléculas, donde para Maxwell esto representa una gran complicación experimental para ser demostrado (Maxwell, 1873).

Continuando con las distintas posturas que se tienen con respecto a la corriente eléctrica, una de ellas viene desde las ideas de Ohm, donde procuró demostrar que la electricidad es muy similar al calor, luego Joule continúa con estas ideas en su trabajo, pero Maxwell en su Tratado niega tal comparación afirmando que “*la electricidad no es como el calor*” (Maxwell, 1873, pág. 36). Es cierto que se han generado un conjunto de analogías con otros fenómenos con el objetivo de facilitar distintas descripciones y llegar a un mejor entendimiento. La primera analogía es con los fenómenos hidrostáticos donde la diferencia de presiones es la que define el flujo de un líquido a través de un ducto, en el caso de la corriente eléctrica Ohm considera la analogía entre temperatura y fuerza electroscópica, que en hidrostática sería la presión, de tal modo que se cumple la relación de a mayor diferencia de temperatura mayor flujo de calor y a mayor diferencia de fuerza electroscópica mayor flujo de corriente. Esta idea funciona para Maxwell, pero la reemplaza con el concepto de potencial eléctrico, donde a mayor diferencia de potencial eléctrico mayor flujo de corriente eléctrica. Pero ¿por qué para Maxwell no se puede comparar la electricidad con el calor? En el transcurso de su Tratado él desarrolla distintas razones, una de las cuales, la más sencilla tal vez, es la siguiente: La naturaleza del calor es una forma de energía, la electricidad no puede ser tratada como tal porque depende de un potencial para poder ser energía,

es decir no son de la misma naturaleza, o como lo dice Maxwell: “*La electricidad es una cantidad física, un sistema electrificado tiene cierta cantidad de energía, pero depende del potencial, por lo que la electricidad y la energía son cantidad de distinta categoría*” (Maxwell, 1873).

De hecho, Maxwell basado en los estudios de W. Thomson sobre la fuerza electromotriz, el trabajo y el calor realiza un análisis a la ecuación de Joule considerando el principio de conservación de la energía: Se tiene que una fuerza electromotriz hace que una corriente fluya a través de un conductor, por lo que la corriente se transfiere de un lugar de mayor potencial a un lugar de menor potencial, y el conductor al sufrir esta transferencia de electricidad no realiza ningún trabajo externo. Por lo que, el principio de conservación de la energía conlleva a buscar trabajo interno en el conductor. Si se habla de un conductor electrolito el trabajo está en relación con la separación de los componentes, a diferencia de un conductor sólido donde el trabajo se da completamente en forma de calor (Maxwell, 1873).

Entonces la energía convertida en calor es igual al producto de la fuerza electromotriz por la cantidad de electricidad que pasa, pero la fuerza electromotriz es igual al producto de la corriente y la resistencia y además, la cantidad de electricidad es igual a la corriente por el tiempo transcurrido, llegando a la siguiente expresión:

$$JH = C^2Rt$$

*Ecuación 10*

Que nos dice que el calor de Joule ( $JH$ ) es proporcional al cuadrado de la corriente ( $C$ ), tantas veces por la resistencia del cuerpo en un determinado tiempo. Lo llama así porque fue el Dr. Joule quien determinó por primera vez el calor desprendido en un tiempo dado, recordando que la resistencia eléctrica es una característica que depende de la naturaleza del material conductor, y no depende del potencial eléctrico al que se encuentre sometido un conductor.

Para terminar con las ideas que buscan describir el fenómeno de la corriente eléctrica, uno de los trabajos que más influyó en la elaboración del Tratado de Maxwell fue el trabajo realizado por Faraday llamado *Experimental Researches on Electricity (Investigaciones experimentales sobre electricidad)* de 1831. De este trabajo Maxwell afirma lo siguiente:

*“De todos los fenómenos eléctricos, la electrolisis parece ser la que tiene más probabilidades de proporcionar una idea real de la verdadera naturaleza de la corriente eléctrica, es por ello por lo que el movimiento opuesto a través de los electrolitos de los iones sería una representación física completa de la corriente eléctrica. Se puede extrapolar a gases y líquidos problema del modelo como fluido y en este caso la fuerza electromotriz actúa en moléculas cargadas”* (Maxwell, 1873).

Cuando la corriente eléctrica en un circuito pasa a través de ciertas sustancias compuestas llamadas electrolitos,<sup>8</sup> se genera un proceso físico que va acompañado con un proceso químico

---

<sup>8</sup> Es una sustancia que se utiliza en las baterías voltaicas, en la cual sucede el fenómeno de la electrolisis, alguna de ellas por ejemplo es el agua con sal, la mezcla de ácido sulfúrico con agua o vinagre. Adicionalmente dichas sustancias también permiten el flujo de corriente.

llamado electrolisis, en el que la sustancia se compone en dos compuestos, el *ion* componente electronegativo propios de Anión y otro electropositivo del Cation, cada uno cumple una función: el Anión por donde entra la corriente y el Cation por donde sale. Faraday propone la ley de electrolisis que después va a ser confirmada en los experimentos de Beetz y Hittor, la cual consiste en lo siguiente: “*El número equivalente de electroquímicos que se descompone en el paso de corriente durante un tiempo dado es igual al número de unidades de electricidad que son transferidas por la corriente en el mismo tiempo*” (Maxwell, 1873). Maxwell en su Tratado desarrolla la manera de cómo definir la unidad eléctrica, entonces existe un equivalente electroquímico de la sustancia electrolizada y la corriente que se genera a través de la sustancia durante un tiempo, lo que después se puede determinar en gramos de sustancia. Entonces la cantidad de materia se encuentra determinada por la definición que Maxwell tiene de unidad de electricidad. De esto último se infiere que estas moléculas cargadas que generan la corriente eléctrica poseen masa, y está de acuerdo con distintas teorías propuestas en otros tiempos, una de ellas en 1734 propuesta por Pieter Van Musschenbroek que lo había llamado *compuesto eléctrico*, un tiempo más adelante Volta lo había llamado *materia eléctrica*, ahora tratados como iones que son moléculas cargadas. Maxwell con respecto a estos dos tipos de moléculas resalta lo siguiente y es que las moléculas del cation con carga positiva poseen la misma carga de los iones, pero opuesta, por lo que se genera ese movimiento opuesto a través del electrolito. Además, Maxwell no se enfoca en la molécula en total, sino en la molécula de electricidad llamada el ion, ya que una de las dificultades que radica en la descripción de tener una molécula total es debido a poder crear una idea clara de la naturaleza del átomo.

A lo largo del Tratado de Maxwell se puede observar que los fenómenos de la corriente eléctrica no cuentan con una teoría unificada que los describiera, lo cual generó que los físicos de la época, no solo Maxwell, se inclinen o estén a favor de algún modelo en específico el cual les permita tener un entendimiento y descripción más cercana con respecto a los fenómenos de la corriente eléctrica. Por lo que se ve necesario poder llegar a determinar experimentalmente qué es la corriente eléctrica y así consolidar una única teoría para entender los fenómenos eléctricos.

## **2.2 J.J. Thomson y el descubrimiento del electrón: la corriente como movimiento de partículas.**

Luego del trabajo de Maxwell los fenómenos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos, se sustentaban en un fuerte Tratado matemático, pero aun existían aspectos que carecían de una demostración experimental, por ejemplo, uno de ellos es el caso de las ondas electromagnéticas, que tiempo más adelante sería demostrado por el físico Heinrich Hertz. Otro aspecto está en relación con la naturaleza de la corriente eléctrica ya que como vimos, dada la variedad de modelos propuestos desarrollados anteriormente, se requiere de una demostración experimental, que ayude a determinar qué es la corriente eléctrica. Es por esto que Sanchez Ron afirma con respecto a la teoría electromagnética que esta “*no se encuentra completa ya que no se evidencia una descripción precisa del fenómeno de la corriente eléctrica*” (Sánchez Ron, 1997). Por último, tenemos que también se carecía de demostración experimental de la existencia de una partícula o molécula cargada, ya que como decía Helmholtz esta se limitaba en el Tratado a ser

un símbolo para poder procesar la teoría, y este punto es la clave que lleva a Joseph John Thomson a investigar las cargas eléctricas en movimiento que se encuentran presentes en la teoría electromagnética. Es así como Thomson se plantea cuál debería ser la fuerza mecánica que experimente una partícula en movimiento cuando actuase sobre ella un campo magnético o eléctrico externo.

Para el estudio de Thomson fue fundamental el experimento de los rayos catódicos de Crookes el cual utiliza y modifica en función de sus intereses de investigación como se muestra en la Ilustración 13. Thomson en el año de 1897 presenta a la revista de ciencias de Edimburgo un artículo sobre rayos catódicos, en el que afirma que los experimentos que llevó a cabo fueron propuestos con la intención de poder obtener algún tipo de información sobre la naturaleza de los rayos catódicos. Para la época habían surgido un conjunto de incógnitas alrededor de estos: por un lado, se intentó describir bajo la teoría de la electrolisis, pero esta funciona mejor para las sustancias por lo que se preguntaban, qué sucede en los gases y a qué se debe ese tipo de rayos; establecían que podrían ser moléculas cargadas que se mueven del cátodo al ánodo, de esta manera lo consideraba Kelvin, como un torrente de moléculas, o también surgía la idea de que podrían ser algún tipo de materia radiante, por lo que se les podía llamar corrientes de materia, pero en una concepción contraria surgen las ideas de Heinrich Hertz, quien los consideraba como ondas de algún tipo descartando la idea de partículas cargadas. (Sánchez Ron, 1997)

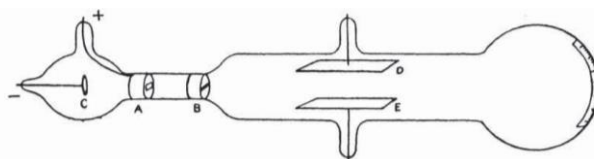


Ilustración 13: Figura incluida en el artículo de 1897, que representa los instrumentos utilizados por Thomson en sus experimentos (Sánchez Ron, 1997)

Tras distintos análisis y estudios Thomson llega a lo siguiente: *“Los rayos catódicos son partículas de gas que transportan cargas de electricidad negativa y que se mueven con grandes velocidades, que han adquirido mientras viajaban a través del intenso campo eléctrico”* (Sánchez Ron, 1997). Adicionalmente esta afirmación fue demostrada también por Perrin, el cual muestra que los rayos poseen carga de electricidad negativa. Por lo que, la hipótesis de Thomson se consolida en que los rayos están conformados por corpúsculos, pequeñas partículas cargadas negativamente que forman parte de los átomos. Con respecto a lo anterior Helmholtz afirma lo siguiente: *“Si las sustancias elementales están compuestas por átomos, no podemos evitar conectar que también la electricidad, positiva y negativa está dividida en partes definidas elementales que se comportan como átomo de electricidad”* y *“los átomos de electricidad existen, pero no se conoce su naturaleza”* (Sánchez Ron, 1997). Además, en su estudio Thomson también descubre que este tipo de rayos pueden ser desviados por un imán.

Dado el efecto de desviación de los rayos catódicos durante los experimentos, se comprobaba que este se comportara como era de esperar, ya que es de esta manera que las partículas cargadas actúan bajo la teoría de Maxwell. Por lo que en este momento la pregunta que se realizaba se

enfocó en este tipo de partículas, ¿serían átomos, moléculas o alguna otra forma de materia de aún más fina división? Con lo que Thomson afirma que “*para arrojar alguna luz sobre este punto, he realizado una serie de medidas del cociente entre la masa de las partículas y la carga que transporta*”. (Sánchez Ron, 1997) Para esta parte Thomson utilizó distintos gases como aire, hidrógeno y ácido carbónico, de lo cual obtuvo los siguientes resultados:  $0,4 \times 10^{-7}$  para el aire,  $0,5 \times 10^{-7}$  para el hidrógeno y  $0,9 \times 10^{-7}$  para el ácido. Considerando que antes de los experimentos de Thomson ya se poseía un coeficiente de  $m/e$  para el ion de hidrógeno en la electrolisis el cual estaba alrededor de las órdenes de magnitud de  $10^{-4}$ , se llega a las siguientes conclusiones:

- Ya que para las medidas que realizó los resultados se encuentran alrededor del mismo orden de magnitud el valor de  $m/e$  es independiente de la naturaleza del gas utilizado.
- Ya que el resultado de  $10^{-7}$  es muy pequeño comparado con  $10^{-4}$ , se debía a tres posibles opciones: Debido a que  $m$  es muy pequeño, si  $e$  es muy grande o una combinación de ambas.
- Ya que los resultados medidos están muy próximos se puede concluir que las partículas son las mismas sin importar el gas a través del cual pasa la descarga.

Con respecto a estas conclusiones Thomson se inclina más por la primera opción donde la masa es más pequeña y formula su hipótesis, la cual consisten en la existencia de corpúsculos que serían unos nuevos átomos primordiales o elementales, y los átomos tradicionales eran ahora divisibles en estos corpúsculos los cuales poseen una carga eléctrica de número unidades electrostáticas la cual coincide con la carga positiva transportada por el átomo de hidrógeno en la electrolisis. En relación con esta teoría Mr. Lammor afirma lo siguiente “*Estos átomos de electricidad producen el fenómeno de la corriente eléctrica al moverse de molécula a molécula de materia como en la conducción metálica ordinaria o por átomos de materia como en la conducción electrolítica*” (Sánchez Ron, 1997, pág. 164). Lo que afirma Lammor es que desde esta hipótesis se puede extrapolar a los distintos tipos de sustancias y se da una primera caracterización amplia de lo que es la corriente eléctrica.

Después de presentar la hipótesis Thomson, a estos átomos de electricidad, como los llama Lammor o corpúsculos como los llamo Thomson, se le tenían distintos nombres como: partícula elemental, subátomo, iones univalentes, pero al final se impone el término de *electrón* sobre los otros debido a que ya había sido utilizado anteriormente por Stoney en 1891 donde afirma que “*para todo enlace químico que se rompe dentro de un electrolito, una cierta cantidad de electricidad, que es la misma en todos los casos, atraviesa el electrolito, esa cantidad se llama electrón*” (Sánchez Ron, 1997). De esta manera cada vez más fue quedando estipulado el término de electrón a esa partícula elemental con carga negativa, para describir los distintos fenómenos de la corriente eléctrica.

Al predominar la corriente eléctrica como movimiento de electrones con carga negativa, hubo quienes se resistieron a la teoría y preferían o se inclinaban por la física del éter

electromagnético, por lo que no aceptaban los méritos de Thomson. Pero hubo otros que aceptaron y recibieron ese nuevo modelo teórico para describir los fenómenos eléctricos, además porque se encontraba sustentado bajo el tratado de Maxwell, uno de ellos por ejemplo fue el físico Edwin Herbert Hall, quien primero había descrito el efecto Hall a través del modelo de la corriente eléctrica como un fluido, pero luego del trabajo de Thomson modifica su trabajo y lo replantea desde el modelo de la corriente eléctrica como el movimiento de electrones a través de un conductor.

Respondiendo a la pregunta ¿qué sucede en el interior de un conductor? Considerando lo anteriormente expuesto es un movimiento de partículas elementales con carga negativa llamadas electrones, que se mueve en el sentido de cátodo a ánodo, y la corriente eléctrica que tanto tiempo mantuvo a prueba a una gran cantidad de físicos y pensadores por fin gracias a los resultados de J.J. Thomson había sido resuelta.

Aunque se respondiera a la pregunta de ¿qué es la corriente eléctrica? aun hacía falta por definir qué características o qué implicaciones tenían los materiales para poder ser considerados como conductores o aislantes, es decir, aún faltaba por verificar que implicaciones físicas conllevaban a que un material posea más resistencia que otro al paso de la corriente, entonces queda la pregunta de ¿a qué se debe la resistencia eléctrica en un cuerpo? la cual se buscará responder en el siguiente capítulo.

## CAPÍTULO 3: FENÓMENO DE LA CORRIENTE ELÉCTRICA EN EL SIGLO XX

El inicio del siglo XX estuvo cargado de descubrimientos, de nuevas explicaciones con ideas revolucionarias alrededor de problemas aun sin resolver en diferentes campos de la física, y particularmente de teorías que intentaban ir más allá de las descripciones que se tenían desde la mecánica Newtoniana, pero manteniendo la tradición de descansar sobre estos principios completamente aceptados por la comunidad científica. Es en este escenario que inicia una nueva forma de pensar y dar cuenta de esas características que describieran a la corriente eléctrica. Sin embargo, al pasar de las décadas fue necesario alejarse en cierta medida de la teoría newtoniana para lograr dar una explicación completa de los fenómenos, incluyendo a la misma forma de concebir la conducción, la forma en que los materiales se clasifican para dar cuenta de su afinidad al paso de la corriente y por supuesto el mismo concepto de corriente.

### 3.1 Modelo de gas de electrones libres - Paul Drude y Arnold Sommerfeld

Tras el descubrimiento del electrón como una partícula elemental a la que se le atribuía como parte fundamental para que se genere el fenómeno de la corriente eléctrica y darse esta nueva forma de entender los fenómenos eléctricos, comenzaron a surgir diferentes estudios con el objetivo de ampliar este conocimiento. Un ejemplo se da a comienzos del siglo XX en el año de 1900 cuando el físico Paul Drude publica en un anuario de física su texto llamado *Zur Elektronentheorie der Metalle* (Sobre la teoría electrónica en los metales), donde menciona que “*la corriente eléctrica se produce mediante el transporte de pequeñas partículas eléctricas, quiero llamar a estas partículas eléctricas electrones o núcleos eléctricos*” (Drude, 1900), ya que en su texto expone que no se encuentra de acuerdo al utilizar el término de J.J. Thomson de *corpúsculos* o el término de Faraday de *iones*, ya que argumenta que estos dos términos van con la idea de masas ponderables, por lo que es más apropiado llamar al núcleo eléctrico como ion, además, este posee carga positiva en los metales. Uno de los objetivos de Drude para realizar este estudio es poder determinar las propiedades ópticas de los metales, esto lo llevo a examinar también los procesos de conducción de corriente, conducción de calor, termoelectricidad entre otros efectos.

En su texto Drude plantea la siguiente hipótesis: “*Existen electrones libres y electrones ligados, los ligados son los responsables del equilibrio en el cuerpo metálico y estos se encuentran unidos a los átomos*” (Drude, 1900) por lo que Drude busca poder determinar cuántos electrones en el metal se mueven libremente y cuántos están ligados, para así poder llegar a saber cuáles son los responsables de los efectos ópticos y por qué. En las valoraciones de su estudio, Drude considera a los electrones libres del metal como un gas, por lo que ve apropiado utilizar la teoría cinética de los gases; dadas estas consideraciones al electrón se le puede atribuir una cierta energía cinética aun teniendo en cuenta su masa muy pequeña, para poder así llegar a una ley de distribución de las velocidades en los electrones. Otra consideración es dotar al electrón de

inercia para poder analizar los cambios en su movimiento como en el caso de los rayos catódicos.

Para la época había distintos físicos que se encontraban pensando acerca de lo que sucede internamente con los electrones en la corriente eléctrica, a Drude le llama la atención una suposición de parte de Giese y la agrega a su texto en la cual dice: “*en el metal el electrón conductor después de recorrer una corta distancia está transfiere su carga eléctrica a una partícula de masa en colisión*” (Drude, 1900). Le llama la atención precisamente la idea de *colisión* y resalta la idea de las interacciones que se pueden dar por los electrones y los iones a través de dichas colisiones, por lo que sería un factor importante que Drude consideraría en su modelo.

Por otro lado, una característica que favorece al estudio de Drude, es que, en la conducción eléctrica en los metales, aparte de considerar el (Wärmetönung) “*teñido de calor de Joule*” (Drude, 1900), la corriente eléctrica no modifica al metal en ninguna forma es decir el metal no cambia, en contraposición con lo que sucede en la corriente electrolita en las sustancias, por lo que el número de electrones y iones se mantendría constante. A lo largo del texto Drude después de realizar distintos análisis llega a varias conclusiones entre las cuales está la siguiente: “*La conductividad eléctrica y térmica está en relación significativa con la cantidad de núcleos eléctricos libres (electrones)*” (Drude, 1900), una conclusión similar que tenía Coulomb en su tiempo, donde la cantidad de partículas conductoras estaba en relación con la capacidad de conducción.

El Trabajo de Drude plantea la primera mirada de la corriente eléctrica en metales, modelado como un gas de electrones, que se mueven libremente (desligados de los átomos) por todo el metal, además que este movimiento es aleatorio debido a las interacciones que sufren por las colisiones con los iones. De este modo lo importante del trabajo de Drude, es que realiza estos planteamientos y consideraciones en el fenómeno de la corriente eléctrica en los metales y así estas ideas serán tomadas y complementadas por otros físicos tiempo más adelante. A pesar de ser un modelo ambicioso que quería dar cuenta de la forma en que la corriente se da al interior del conductor y las propiedades de conducción eléctricas y térmicas, no logra dar explicación teórica a varios de los elementos clave en el estudio experimental de la conducción en materiales, como la capacidad calorífica, la conductividad eléctrica o el camino libre medio de los electrones en el interior del conductor.

Pasaron varios años hasta que, en 1927, el físico Arnold Sommerfeld utilizando los nuevos conocimientos de la física moderna, tomara las ideas de Drude y las complementara. Para ese tiempo, la física moderna estaba en su auge, lo cual permitió reinterpretar el mundo de la física de una manera completamente nueva. En consecuencia, surgieron las bases para diferentes ramas de la física, que se enfocaron en distintos campos de estudio. Es el caso de la física del estado sólido, consolidada formalmente con su definición actual en la segunda década del siglo XX, pero cuyos trabajos inician a principios de este mismo siglo, esta se enfoca en el estudio de las propiedades de los sólidos a un nivel atómico y molecular. En el texto de *Física del Estado Sólido* de Juan Meléndez se puede encontrar que un sólido se define de la siguiente manera: es

un cuerpo que posee volumen y forma bien definida, son incapaces de fluir y su compresibilidad es nula, son sistemas formados por un gran número de átomos o moléculas, en la mayoría de los casos la estructura atómica que poseen es de orden cristalino, donde un cristal consiste en una disposición regular y periódica de átomos en tres dimensiones, esta red ha sido demostrada experimentalmente por los experimentos de difracción de rayos x (Melendez Ramirez, 2012).

Sommerfeld retoma la idea del gas de electrones en los metales y la plantea con el modelo de electrones libres como se muestra en la ilustración 14a. Estos electrones libres son débilmente ligados al átomo y son fundamentales para la capacidad de conducción del metal, además los otros electrones internos están fuertemente ligados al núcleo, de este modo se modela el núcleo con los electrones ligados como una esfera dura con carga positiva denominada *partícula reticular*<sup>9</sup>.

Al someter el metal a un campo eléctrico o a un gradiente de temperatura, los electrones libres se excitarán y comenzarán a adquirir energía en forma de movimiento. Es así como Sommerfeld también trae a su modelo la idea de Drude del tiempo medio entre colisión, la cual consiste en que cada cierto tiempo hay una interacción entre un electrón libre con una partícula reticular, el promedio de este tiempo se denomina *tiempo medio entre colisiones* y se denotado con letra  $\tau$ . Adicionalmente considerando del modelo de Drude que los electrones en conjunto experimentan movimientos aleatorios en el interior del metal, Sommerfeld utiliza en su modelo el concepto de *velocidad media del gas electrones*, como se muestra en la ilustración 13b. Entonces cada electrón tiene un momento ( $\hbar k$ ) que variará dependiendo de si el electrón sufre una colisión con un ion, si no, solo experimenta una fuerza que lo acelera con respecto al campo eléctrico. De este modo se describe al electrón bajo el vector de onda que varía con respecto al tiempo.

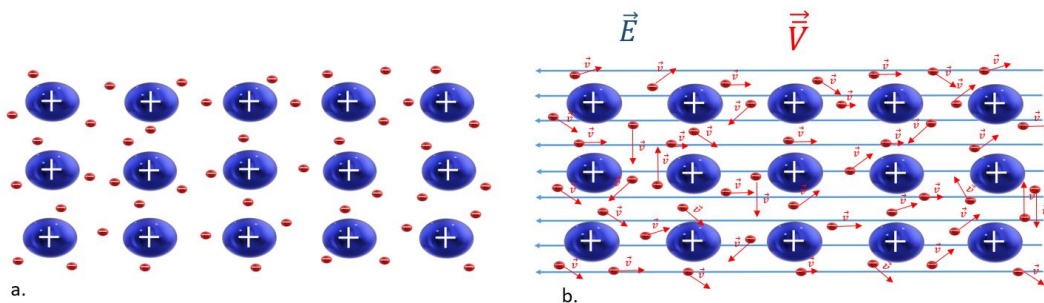


Ilustración 14: a. Modelo de electrones libres de Sommerfeld. b. Representación del movimiento aleatorio los electrones en presencia de un campo eléctrico y la velocidad media del gas de electrones (ilustración propia).

En la ilustración 15 se muestra como sería el comportamiento de un electrón que es acelerado por el campo eléctrico y se mueve a través de los iones del metal. Desde el tiempo cero a  $t_1$  el electrón es acelerado y su vector de onda crece linealmente, hasta que el electrón experimenta una colisión en el instante  $t_1$ , la cual se considera un evento instantáneo que modifica el estado de movimiento del electrón. Luego, de  $t_1$  a  $t_2$  el electrón sale con una velocidad opuesta

<sup>9</sup> Las partículas reticulares son los núcleos atómicos en conjunto con los electrones fuertemente ligados, usualmente en los metales poseen carga positiva y se les llama iones.

después del choque que lo devuelve y así el campo eléctrico se encarga de detenerlo, luego de  $t_2$  hasta  $t_3$  el campo eléctrico lo vuelve acelerar, así el electrón se mueve en promedio durante un tiempo  $\tau$ , hasta experimentar una nueva colisión en  $t_3$ , de esta manera sigue sucesivamente para todos los electrones del metal.

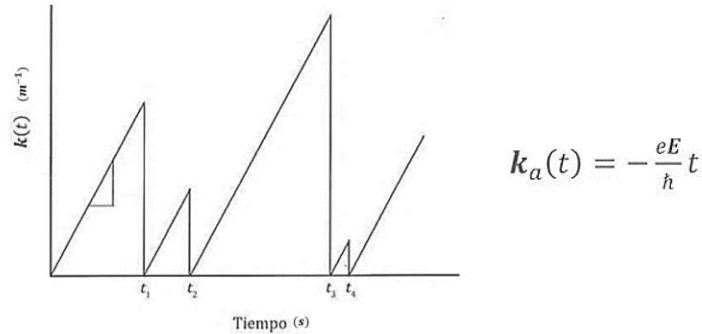


Ilustración 15: Variación del vector de onda de los electrones en función del tiempo (Melendez Ramirez, 2012)

Una pregunta que surge bajo este modelo es que si el electrón posee carga negativa y la partícula reticular posee carga neta positiva, ¿por qué la fuerza Coulombiana no actúa bajo estas colisiones? Lo que se explica es que la fuerza Coulombiana si afecta, pero se hace despreciable, ya que como se mencionó anteriormente Sommerfeld trae a su modelo bases teóricas de la mecánica cuántica, una de ellas es el principio de exclusión de Pauli el cual consiste en que dos electrones no pueden encontrarse en el mismo estado o no pueden tener los mismos números cuánticos<sup>10</sup>. Por lo que este principio se considera como una interacción de tipo repulsivo, lo que genera que una vez los átomos completando las condiciones de estabilidad los electrones libres no puedan acercarse a estos.

Por otro lado, la colisión significa un intercambio de energía entre electrón y la partícula reticular, bajo el modelo de Sommerfeld es importante destacar que inmediatamente después de cada colisión (elástica), el electrón emerge a una velocidad que no se relaciona con su velocidad de antes de la colisión, sino que esta es proporcional a la temperatura local de la colisión, es decir cuanto mayor sea la temperatura de la región de colisión mayor será la velocidad de salida del electrón (Melendez Ramirez, 2012). Y es que las implicaciones de la temperatura son muy importantes al estudiar el comportamiento molecular y atómico en la estructura cristalina en los metales, es por esta razón que Sommerfeld toma las características de la teoría cinética molecular moderna y las agrega al modelo.

Esta teoría tiene sus inicios en el año de 1906 cuando Albert Einstein realizando un estudio de los sólidos con respecto a su calor específico, publica un artículo llamado *Die plankshe theorie der strahlung und die theorie der spezifischen wärme* (Teoría de la radiación de Planck y la teoría de calor específico), en el que menciona lo siguiente: “*El Sr. Drude ha demostrado que los*

<sup>10</sup> Los números cuánticos ( $n, l, m_l, m_s$ ) son valores numéricos discretos que están asociados directamente para caracterizar el estado estacionario del electrón dependiendo ciertas magnitudes físicas como el spin, la energía, entre otros.

*fenómenos de dispersión conducen a atribuir a cada átomo móviles independientemente, relacionando con éxito las frecuencias naturales ultrarrojas con la vibración de los átomos”, de lo que argumenta “La idea más simple que uno puede formarse sobre el movimiento térmico en cuerpos sólidos, es que los átomos individuales que contienen realizan oscilaciones sinusoidales alrededor de posiciones de equilibrio” y agrega “Sin embargo, la suposición de que las estructuras elementales en cuestión tienen una frecuencia de oscilación independiente de la energía (temperatura) es sin duda inadmisibles” (Einstein , 1906). Con respecto a lo que afirma Einstein, es preciso recordar que unos años antes en 1900, Planck había presentado los resultados de su descubrimiento con respecto a la radiación de cuerpo negro en una conferencia a la Sociedad Alemana de Física. Gracias a este trabajo de Planck, Einstein llega a la teoría de los cuantos de luz, adicionalmente Roberto Martínez menciona lo siguiente:*

*“Einstein mostró que la radiación de cuerpo negro no solo tenía influencia en los electrones sino también en los iones cargados. Si estos iones están amarrados a una red sólida, la energía de las vibraciones iónicas está restringidos a múltiplos enteros de  $h\nu$ ” (Martinez, 1999).*

Por otro lado, es importante recalcar que, bajo la mirada de Einstein, los átomos de los sólidos están oscilando pero que además estas oscilaciones tienen una relación directa con la temperatura, por lo que al calentar un cuerpo este experimenta cambios en el contenido energético. Por último, Einstein menciona que *“todos los sólidos que conducen electricidad contienen masas que se mueven libremente”* (Einstein , 1906). A este modelo se le denominó *modelo de Einstein*, el cual sería tomado unos años más adelante por el físico Peter Debye y lo complementaría con algunos aspectos específicos mencionados en el texto de Meléndez, y son los siguientes:

- Las partículas reticulares que constituyen a los sólidos se encontrarían en un sistema de  $N$  osciladores *acoplados* que vibran en torno a su posición de equilibrio en tres dimensiones.
- El sólido se comporta como un medio no dispersivo, es decir, las frecuencias de las ondas que se propagan por el cristal se relacionan con sus vectores de ondas correspondientes  $\omega(k) = v_s k$ . Donde  $v_s$  es la velocidad del sonido en el cristal.
- La energía de los osciladores está *cuantizada*, y el cuanto de energía es  $\hbar\omega$ .

Sommerfeld toma este modelo y lo lleva al modelo de electrones libres, el cual consiste en que las partículas reticulares se encuentran vibrando internamente en el metal, por lo que, a temperaturas altas las vibraciones aumentan en la red, y a su vez conllevaría a que las interacciones por colisiones aumenten, a diferencia de lo que ocurre a temperaturas bajas donde disminuyen las interacciones entre electron y partícula reticular. En la ilustración 15, se presentan algunos datos experimentales que se relacionan con la teoría de Sommerfeld, aquí se muestra la relación de conductividad eléctrica con la temperatura, donde se puede evidenciar que a mayor temperatura la conductividad eléctrica disminuye, consecuencia del aumento de

colisiones entre electrones y partículas reticulares y por el contrario a menor temperatura la conductividad eléctrica aumenta.

Elemento	77 K	273 K	373 K
Li	0.96	0.12	0.08
Na	1.25	0.24	Fundido
Cu	5.00	0.64	0.45
Ag	3.30	0.66	0.47
Au	2.00	0.49	0.35
Fe	1.52	0.11	0.07
Zn	0.91	0.18	0.13
Al	3.30	0.41	0.28

Ilustración 16: Fragmento de tabla de conductividad eléctrica en  $10^6 \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$  de varios elementos metálicos con relación a distintas temperaturas (Meléndez Ramírez, 2012).

Entonces al someter un metal a un campo eléctrico, se observa una densidad de corriente que se relaciona con el campo aplicado a través de la ley de Ohm, con la siguiente expresión  $J = \sigma E$  donde  $\sigma$  es la conductividad eléctrica del metal, y  $E$  es la intensidad del campo eléctrico. Adicionalmente la conductividad eléctrica es inversamente proporcional a la resistividad  $\rho = 1/\sigma$ , y considerando ya lo planteado, la conductividad depende de la temperatura, incluso Meléndez completa esta idea afirmando que “la conductividad también depende del grado de pureza del metal” (Meléndez Ramírez, 2012).

En consecuencia, para el modelo de Sommerfeld, tenemos que la conductividad eléctrica en metales se debe a la interacción con las partículas reticulares vibrantes, donde las vibraciones de estas dependen fuertemente de la temperatura. Así se llega a la conclusión de que al aumentar la temperatura disminuye el tiempo entre colisiones, por lo que se cumple la relación de que  $\tau$  es inversamente proporcional a la  $T$  del metal.

Sin embargo, en el modelo de Sommerfeld se presentan varias inconsistencias para tratar el fenómeno de la conducción eléctrica en los metales, una de ellas, por ejemplo, es que no se considera en ningún momento la interacción entre electrones libres y como afecta esto la conducción. Otro factor es que no logra determinar de qué manera se da la dependencia de la conductividad eléctrica con la temperatura. Si se analiza desde la ecuación de conductividad eléctrica propuesta por Sommerfeld:

$$\sigma = \frac{n_e e^2 \tau}{m_e} \tag{Ecuación 11}$$

Esta nos dice que la conductividad está expresada como el número de electrones libres del metal, multiplicado por el cuadrado de la carga del electrón y el tiempo medio entre colisiones, todo esto dividido por la masa del electrón. De aquí se analiza que la conductividad es proporcional al tiempo medio entre colisiones y este factor es inverso a la temperatura ya que se asume desde los

resultados experimentales, de modo que  $\tau \propto \frac{1}{T}$ . Pero esta expresión no se generaliza y por tanto no se determina con precisión, quedando descrita de la siguiente forma:

$$\sigma \propto \frac{n_e e^2}{T m_e} \quad \text{Ecuación 12}$$

Esto lleva a establecer que hay una dificultad para encontrar la igualdad en la expresión, y se da porque no se encuentra un factor que muestre cómo cambia la conductividad para diferentes metales en los cuales el número de electrones libres es el mismo. Por último, otro aspecto que carece el modelo de Sommerfeld es que no se puede extender a otro tipo de materiales no metálicos.

### 3.2 Modelo de conducción en los metales mediante el estudio de las interacciones en la red - Félix Bloch

Continuando con los trabajos realizados que se encargaron de encontrar la manera de poder entender y describir los fenómenos de la corriente eléctrica y la conducción eléctrica, uno de ellos vino indirectamente por parte del físico teórico alemán Werner Karl Heisenberg padre de la física cuántica. El primer estudiante de posgrado que tomo Heisenberg fue Félix Bloch, tal como lo cuenta Robert Hofstadter, un gran amigo y compañero de Bloch quien escribió su biografía, donde menciona lo siguiente:

*“Heisenberg le sugirió que para su tesis debería estudiar la conductividad de los metales aplicando la nueva teoría de la mecánica cuántica, se trataba de un problema bien conocido de la teoría clásica cuya solución completa había desconcertado a físicos tan consumados como Drude, Lorentz, Pauli y Sommerfeld”* (Hofstadter, 1994)

De las causas que llevaron a Heisenberg a proponerle esto a Bloch está el hecho de que, aunque para la época se utilizaba el modelo de electrones libres, nadie entendía por qué los electrones de conducción debían tratarse como un gas ideal de electrones libres. Además, que los resultados con respecto al calor específico en metales y los resultados de la relación de conductividad eléctrica y térmica, en cuanto a lo experimental se aproximaban, pero no eran precisos. Es así como Bloch acepta y empieza a trabajar alrededor de este problema; al comenzar su estudio Bloch menciona *“cuando comencé a pensar en ello sentí que el principal problema era explicar cómo los electrones podían escabullirse entre todos los iones de un metal para evitar un camino libre<sup>11</sup> medio del orden de distancias atómicas”* (Hofstadter, 1994). Evidentemente, Bloch se centra en la idea de encontrar un mecanismo que le permita establecer cómo se da el *camino libre medio* de los electrones de conducción en el metal y cómo se encuentra relacionado con lo que se muestra en los experimentos.

---

<sup>11</sup> Se refiere como recorrido libre medio  $l$  de un electrón de conducción como  $l = v_f \tau$  donde  $v_f$  es la velocidad en la superficie de Fermi. El camino libre cambia según la temperatura del metal, es decir si aumenta la temperatura disminuye el tiempo entre colisiones y disminuye el camino libre medio. Experimentalmente para el cobre se han encontrado valores de camino libre a 4K de 0.3 cm y a 300K de  $3 * 10^{-6}$  cm cumpliendo con la anterior aseveración. Por otro lado, se han observado recorridos libres tan largos como de 10 cm en metales muy puros dentro del intervalo de temperaturas del Helio líquido

Para el año de 1929 se publica el trabajo de Bloch llamado *Über die Quantenmechanik der Elektronen in Kristallgittern* (Sobre la mecánica cuántica de los electrones en los cristales). El trabajo de Bloch se caracteriza porque demuestra que, al agregar la *estadística de Fermi*<sup>12</sup> a los electrones libres y a su vez considerar las oscilaciones térmicas de los átomos en la red<sup>13</sup>, se obtiene como resultado la dependencia de la magnitud de la temperatura con la conductividad eléctrica en metales. Es por ello por lo que es tan importante este trabajo, ya que resuelve uno de los problemas a los que llega Sommerfeld en su modelo y era demostrar esta dependencia, inclusive su resultado permite abarcar otro tipo de materiales.

Para comenzar su estudio Bloch plantea que para poder examinar correctamente la conductividad eléctrica en un cristal se deben responder a dos preguntas:

1. ¿Cómo cambia el movimiento de los electrones cuando se aplica un voltaje?
2. ¿Cómo *interactúan* los electrones con las oscilaciones térmicas de la red?

Esto conlleva a Bloch a tener distintas consideraciones en el momento que los electrones están siendo acelerados al aplicar un campo homogéneo. Menciona que los N electrones libres viajan a través de la red y solo se desvían como resultado del movimiento térmico de los átomos, así de este modo se da lugar a un camino libre finito y a una conductividad. Además, retoma del modelo de Sommerfeld las ideas de electrones libres y electrones fuertemente ligados, donde a partir de esta mirada le servirá para considerar materiales como malos conductores y aislantes en su estudio.

Otra consideración bastante importante es que la interacción entre electrones y átomos ya no será considerada como una colisión clásica si no ahora como un intercambio cuántico. Por lo que Bloch menciona lo siguiente “*Los procesos de dispersión esenciales no son colisiones elásticas de electrones sino colisiones que van acompañadas de un pequeño, pero muy específico intercambio de energía con la red*” (Bloch, 1929). Por último, establece que la resistencia de un cuerpo por el que pasa una corriente eléctrica es una composición de la resistencia debido al movimiento atómico dependiente de la temperatura y la resistencia debido a las impurezas del material, denominada una *resistencia residual* que es independiente de la temperatura.

La interacción entre electrones y los átomos de la red cristalina es un aspecto muy importante en los fenómenos de la corriente eléctrica, con respecto del trabajo de Bloch esta interacción se da a partir de un intercambio preciso de energía, de este modo surge la siguiente pregunta: ¿Qué significa ese intercambio y como se da? Con respecto a esta pregunta Meléndez afirma lo siguiente: “*dado en virtud del principio de dualidad onda-partícula tiene sentido asociar a cada excitación elemental una cuasipartícula virtual de energía y cantidad de movimiento*” (Melendez Ramirez, 2012). Esta cuasipartícula que se crea permite explicar el modo en que se da este

---

<sup>12</sup> La estadística de Fermi es la forma de contar estados de ocupación de forma estadística en un sistema de fermiones.

<sup>13</sup> Se utilizará el termino de átomo de la red o átomo, en los casos que se refieran a cualquier tipo de material ya sea metálico, aislante o semiconductor, y el termino de partícula reticular es preciso para referirse de los iones de un metal.

intercambio de energía y teniendo en cuenta la mecánica cuántica se puede asociar a cada vibración una partícula virtual llamada *Fonón*. El fonón está en función de la temperatura, por lo tanto, internamente en el material, el fonón puede interactuar de dos maneras distintas como nos lo menciona Meléndez:

1. Interacción Partícula Reticular – Fonón: En este caso el electrón transmite su energía a la red por lo que el momento cristalino aumenta.
2. Interacción Electrón – Fonón: El electrón recibe parte de la energía de la red de manera que el número cuántico de una cierta oscilación de frecuencia disminuye, es decir el momento cristalino disminuye (Melendez Ramirez, 2012, pág. 208)

En otras palabras, el primer tipo de interacción se da entre la partícula reticular y el fonón, en este caso el electrón al adquirir energía en forma de movimiento por consecuencia de la presencia del campo eléctrico e interactuar con una partícula reticular, libera un fonón por lo que disminuye su energía y disminuye su velocidad. Por otro lado, el segundo tipo de interacción se refiere al caso cuando un electrón al acercarse a una partícula reticular aumenta su velocidad y esto es debido a que la partícula reticular emite un fonón y el electrón lo absorbe, de este modo disminuye la frecuencia de oscilación de la red.

En el trabajo de Bloch se puede encontrar una expresión que describe cuándo un electrón cambia de energía, cuándo emite o absorbe un fonón, es decir cuándo el electrón pasa de un estado con una cierta cantidad de energía a otro, esta energía corresponde con un valor  $h\nu$ , la expresión es la siguiente:

$$E_{klm} - E_{k'l'm'} = \pm h\nu (f_1 g_1 h_1 j_1)$$

*Ilustración 17: Ecuación del trabajo de Bloch (Bloch, 1929, pág. 584)*

Donde  $E_{klm}$  y  $E_{k'l'm'}$  muestran dos valores de energía diferentes para un electrón cuándo interactúa con una partícula reticular, la diferencia de energías muestra si el electrón emitió o absorbió un fonón en la interacción.

Analizando este aspecto en relación con el fenómeno físico, se había establecido que un conductor por el que pasa una corriente eléctrica desprenderá energía en forma de calor según la ecuación de Joule, la cual muestra que esta energía es proporcional a la resistencia del cuerpo. Luego se propuso que la resistencia del cuerpo se debe a que los electrones interactúan con las partículas reticulares del material las cuales están vibrando. Desde la teoría de Bloch, a medida que los electrones emiten fonones hacia las partículas reticulares estas aumentarán la vibración, por lo que cada vez será más difícil para los electrones moverse dentro de la red, es decir aumenta la resistencia del cuerpo, como se mostró en la ilustración 16 (la comparativa entre conductividad y temperatura) y como consecuencia de esto, el camino libre medio de los electrones será más corto. Teniendo en cuenta este aspecto, como consecuencia de las múltiples interacciones entre electrones y partículas reticulares en el interior del conductor, este empieza a emitir calor. En el trabajo de Bloch se encuentra una afirmación que se relaciona con esto último,

la cual dice lo siguiente: “*las colisiones de los electrones van a acompañadas de un intercambio de energía, en primer lugar, esta es por supuesto la causa del calentamiento de un conductor por el que circula una corriente*” (Bloch, 1929).

Continuando con el trabajo de Bloch, después de realizar su estudio él demuestra la dependencia de la conductividad eléctrica con la temperatura, menciona que esto se toma a partir de un sistema que satisface la estadística de Fermi. Pero dada la dificultad que se le presentó al trabajar con celdas de red con parámetros distintos (es decir celdas con forma de paralelepípedos), reduce el problema al trabajar con celdas cubicas con un único parámetro de red, gracias a esto Bloch logra llegar a la siguiente expresión de la conductividad eléctrica:

$$\sigma = \frac{4(6\pi^2x)^2}{3\pi^5} \cdot \frac{e^2 d \tau \omega v a^2 \mu^2}{m C^2 h} \left( \frac{h\nu}{ak\theta} \right)^5 \cdot \frac{\theta}{T} \quad \text{Ecuación 13}$$

Lo más importante de esta expresión es que se encuentra que la conductividad en un metal está en función de la temperatura de modo que  $\sigma(T)$ . Además de eso se encuentra aspectos como los siguientes: La carga del electrón  $e$ , la densidad de la sustancia  $d = \frac{M}{V}$ , donde  $V$  es el volumen de la muestra del cristal,  $\tau$  es el tiempo medio entre colisiones,  $\omega$  es una energía con orden de magnitud de  $10^{-12} \text{ erg}$ ,  $\nu$  es la frecuencia de osificación de la red,  $a$  corresponde con el parámetro de red,  $\mu = \frac{8\pi^2m}{h^2}$ ,  $m$  es la masa del electrón,  $C$  es el cuadrado recíproco de una longitud del orden de magnitud al radio atómico  $10^{-8}$ ,  $h$  es la constante de Planck,  $k$  esta en relación con el vector de onda,  $\theta$  es la temperatura característica del cuerpo y  $T$  la temperatura. Por otro lado, Bloch agrega que la resistencia se obtiene de la proporcionalidad con la temperatura de modo que  $W(T) = \frac{1}{\sigma(T)}$ .

Una dificultad que se encuentra en esta solución es que no funciona bien a temperaturas bajas, ya que los materiales presentan comportamientos completamente diferentes a estas temperaturas, a lo que Bloch menciona: “*en ocasiones experimentalmente se encuentra una resistencia en el cero absoluto que es aproximadamente a una cuarta parte de la resistencia a temperatura ambiente*” (Bloch, 1929). En este sentido teniendo en cuenta la expresión de Bloch, la resistencia debería ser cero en el cero absoluto. Por lo que Bloch menciona lo siguiente: “*Contradice completamente a la experiencia sobre todo porque la disposición de rayos X indica claramente la existencia de un movimiento de punto cero*” (Bloch, 1929). Con respecto a esto último Bloch es consciente de que su teoría no es completa ya que no logra conectar esta incoherencia entre lo teórico y lo experimental.

Bajo esta dificultad en la teoría de Bloch, de la cual él es consciente, construye una explicación al respecto para darle sentido: primero al bajar la temperatura la liberación de energía a través de la red se vuelve cada vez menos posible, porque la red contiene menos energía, pero la absorción si es posible, por eso queda lo que llama una *resistencia residual* en el cero absoluto. Es decir, los electrones siguen presentando una dificultad al moverse ya que ceden energía a la red. Segundo los electrones pasan a un equilibrio térmico y liberan cada vez menos energía a la red y así el proceso que genera la resistencia residual se vuelve cada vez más raro y la resistencia

residual desaparece, además, las oscilaciones naturales se vuelven más prolongadas. Por último, Bloch agrega lo siguiente: “*El hecho de que tal transición realmente se produzca lo demuestra el fenómeno de la superconductividad, que sin embargo sigue sin explicarse hasta el día de hoy 25 de junio de 1928*” (Bloch, 1929)

En la biografía realizada por el físico Robert Hofstadter sobre la vida de Félix Bloch, menciona los alcances y aportes en la física tras la publicación del trabajo de Bloch; Menciona que Bloch fue uno de los más grandes físicos del siglo XX, además de considerarlo como uno de los padres de la física del estado sólido. Un aspecto clave que resalta es el resultado de Bloch de cómo describe a los electrones en un sólido cristalino a través de la función de onda, a la que se le llamo *Estado de Bloch* u *ondas de Bloch*. Además, logra describir la conducción eléctrica en materiales no conductores (aislantes) y conductores (metales), extendiendo la teoría de Sommerfeld, este aspecto fue fundamental para que el físico matemático Sir Alan Herries Wilson, completara su estudio en los materiales semiconductores, y propusiera su teoría de bandas (Hofstadter, 1994).

### **3.3 Conducción en los sólidos, explicación desde la teoría de Bandas - Sir Alan Herries Wilson**

En el periodo de 1929, después de la publicación del trabajo de Bloch, hasta 1936 fue un tiempo crucial para Sir. Wilson ya que este logra construir su teoría de Bandas para la conducción eléctrica. Primero publica un libro en 1936 llamado *The theory of metals (La teoría de los metales)*; luego publica otro más, unos años más adelante en 1939 llamado *Semi-conductors and metals (Semiconductores y metales)*. Sondheimer menciona que Sir. Wilson fue otros de los padres fundadores de la física del estado sólido, además, que sus ideas subyacen a la invención del transistor y muchos de los avances en microelectrónica que están revolucionando la tecnología actual (Sondheimer, 1999).

Sir. Wilson era consciente de los problemas de las teorías propuestas hasta 1928 frente a los fenómenos de la conducción eléctrica, así lo expone en un artículo llamado *Apportunities Missed and Oportunities Seized (Oportunidades perdidas y oportunidades aprovechadas)* en donde menciona las dificultades en los modelos de Drude, Lorenz, Pauli, Fermi, Dirac y Sommerfeld. Además, en este artículo dice lo siguiente: “*El comportamiento del camino libre medio era inexplicable en cualquier teoría clásica de colisiones*”, él realiza esta afirmación ya que estos modelos no consideran el momento angular intrínseco de los electrones, el Espín<sup>14</sup>, por lo que agrega que “*... la explicación correcta la dio F. Bloch en 1928*”. Con respecto a esto Sir. Wilson atribuye gran importancia a la demostración de Bloch de la función de onda del electrón y menciona: “*Bloch demostró que la función de onda de un electrón debe ser de la forma  $\psi_k(r) = e^{ikr} u_k(r)$ , donde  $u_k$  es la periodicidad de la red*” (Alan Herries, 1980). Es decir, esta expresión describe que mientras  $k$  sea real, la función de onda de un electrón en una red cristalina es una

---

<sup>14</sup> El Espín es una propiedad intrínseca de las partículas elementales, con valor fijo la cual fue propuesta la hipótesis en 1926 por G.E Uhlenbeck y S.Goudsmit (Alan Herries, 1980).

onda plana y un electrón de conducción se describe convenientemente como un electrón casi libre.

Pero no fue el único aspecto que resalta del trabajo de Bloch, para Sir Wilson fue muy importante que Bloch lograra dar una explicación físicamente plausible de la variación y magnitud de la temperatura con respecto al camino libre medio, determinando propiedades de los electrones cuasi libres. Aunque Sir. Wilson lo menciona como la primera aproximación, ya que, en el trabajo de Bloch, este realiza el desarrollo alrededor de considerar una red cubica simple con un único parámetro de constante de red  $a$ . Pero gracias a estas consideraciones, Bloch dedujo el nivel de energía fundamental de un átomo aislado, utilizando la estadística de Fermi que daba cuenta de los niveles de energía de los átomos. Con esta energía Bloch también demostró que la velocidad de un electrón se encuentra estrechamente ligada con la función de onda en relación con el campo eléctrico.

Frente a la teoría de Bloch, Sir. Wilson para entender la relación entre el campo eléctrico y el paquete de ondas, construye una forma simplificada e intuitiva, en la que considera a los electrones cuasi libres como electrones de valencia en los átomos individuales. Además, de considerar la creación de capas abiertas y cerradas, llamadas *Bandas*. Esta es la base de la teoría de Bandas que Sir. Wilson va a publicar años más adelante, y comienza con una forma más simple de entender la teoría de la conducción eléctrica propuesta por Bloch.

En el año de 1931 Sir. Wilson fue invitado a impartir un Coloquio frente a las teorías de los metales en la universidad de Leipzig (Alemania). En este Coloquio tenía que abarcar la teoría de Peierl y Bloch, con lo que menciona lo siguiente “*La teoría de Bloch había demostrado ser demasiado, antes de su trabajo era difícil comprender la existencia de los metales*” (Alan Herries, 1980). Con respecto al trabajo de Bloch, Sir. Wilson tenía unas inconformidades ya que él presentaba a los aislantes como *malos conductores*, algo con lo que no terminaba en estar de acuerdo. Para Sir. Wilson los aislantes son *no conductores*, cabe recalcar que hay una gran diferencia en la forma en que se conciben, siendo así la diferencia entre aislantes y conductores.

En la Universidad de Leipzig se encontraba Heisenberg y fue él quien motivo a Sir. Wilson para dar este Coloquio. Sir. Wilson le compartió a Heisenberg sus pensamientos, a lo que respondió que lo mejor para poder evaluarlos era mencionarlos directamente al propio Bloch, es así como Heisenberg lo invita a la discusión. En principio la respuesta de Bloch fue refutar la hipótesis de Sir. Wilson. Un día después Sir. Wilson se acerca a Bloch y le expone sus nuevos argumentos frente a su teoría en los que menciona lo siguiente:

*“... los niveles de energía se dividen en bandas, pero las bandas pueden superponerse, por lo tanto, se deduce que un sólido elemental con una valencia impar tenía que ser un metal, mientras que los elementos con una valencia par podían producir un metal o un aislante”* (Alan Herries, 1980)

Las ideas de Sir. Wilson de Bandas de energía llamó la atención de Bloch, pero había que trabajar más al respecto. Por lo que Bloch no considero apropiado realizar esta discusión en el Coloquio que estaba por presentar Sir. Wilson. Es así como se planteó un segundo Coloquio tres

meses después. En este segundo se discute alrededor de las diferencias reales entre los metales, semimetales y aislantes.

Para la definición de semimetal utilizaron la definición publicada por E. Grüneisen en 1928 en su estudio sobre la conductividad en los sólidos, en esta él los clasificaba dependiendo la forma de las curvas de la resistencia y temperatura que obtenía experimentalmente, y los llamo metales, semimetales y aislantes, Entonces para Grüneisen un semimetal es: “*como un conductor metálico cuya resistencia era alta a bajas temperaturas pero que disminuía al aumentar la temperatura hasta alcanzar un mínimo*” (Alan Herries, 1980). Sir. Wilson con respecto al trabajo de Grüneisen menciona que las gráficas presentadas no estaban realizadas correctamente, ya que en sus pruebas no utilizó materiales puros, por lo que la mala conducción se le podía atribuir a la impureza en los sólidos. En este momento se genera un malentendido, ya que en la comunidad científica se pensó que estos semimetales eran metales impuros por lo que no le atribuyeron el enfoque que requería. Es por esta razón que Sir. Wilson enfoca su trabajo para demostrar de qué manera se da el comportamiento de la corriente eléctrica y la conducción en los distintos sólidos.

Tras esto, Sir Wilson escribe un artículo en 1936 a la Royal Society explicando detalladamente su teoría para argumentar la existencia de los verdaderos semiconductores. A lo largo de este artículo explica que existe una banda de energía que se encuentra completa, y los electrones al excitarse por el aumento de temperatura y superar una brecha de energía, podrían pasar a la siguiente banda. Es así como argumenta el mecanismo por el cual se puede producir electrones libres en una banda de energía que anteriormente se encontraba vacía, a diferencia de los metales que estos si la tienen llena (Alan Herries, 1980). Entonces bajo la mirada de Sir. Wilson es fundamental precisar que lo que diferencia un material de otro, está en relación con cómo se distribuyen los electrones en las Bandas ya sean electrones débilmente ligados o los que están más ligados al átomo, ya que se caracteriza una brecha de energía necesaria para poder producir los electrones libres.

En la Ilustración 18, se muestra una representación de la teoría de Bandas para los distintos sólidos. En el caso de los conductores las Bandas de valencia y conducción se encuentran superpuestas, esto significa que los electrones requieren una mínima energía para pasar de ser electrones de valencia a electrones de conducción, a diferencia de los otros sólidos Semiconductores y Aislantes donde existe una brecha de energía que se debe superar para que los electrones pasen de una Banda a la otra. En los Semiconductores y los Aislantes la brecha de energía está en relación con una Banda Prohibida del inglés *bandgap*, en el caso de los semiconductores esta brecha de energía no es muy grande, de este modo, si se proporciona una cantidad determinada de energía, los electrones en la Banda de Valencia pueden pasar a la Banda de Conducción, generando que estos materiales puedan conducir la corriente eléctrica, esto mediante aplicar fuertes campos eléctricos o al aumentar su temperatura. A diferencia de los Aislantes donde esta brecha de energía es muy grande y la energía necesaria para que los electrones pasen de una Banda a la otra supera a la resistencia del material, por lo que se dañaría, es decir los aislantes no poseen la característica de poder conducir la corriente eléctrica. Por

último, la Banda Prohibida está en relación con una Banda donde no se les permite a los electrones estar, es por esto que deben pasar de la Banda de Valencia a la Banda de Conducción.

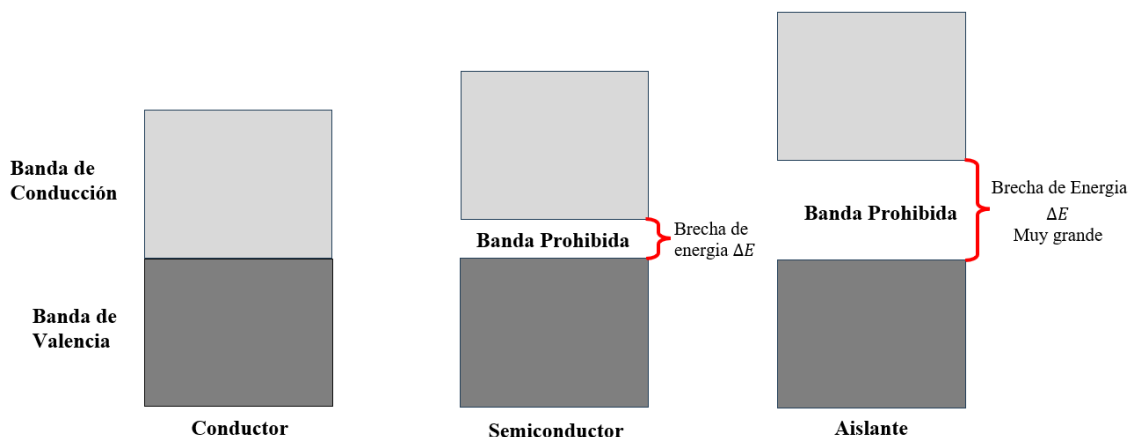


Ilustración 18: Representación de la teoría de Bandas de Sir. Alan Herréis Wilson. (Ilustración propia)

Gracias a esta teoría propuesta por Sir. Wilson se logra generalizar el fenómeno de la corriente eléctrica y la conducción eléctrica en los diferentes tipos de materiales, que a través de la historia habían mantenido en gran atención a diferentes físicos y pensadores sobre su comportamiento. Meléndez menciona lo siguiente al respecto de la teoría de Bandas:

*“Así pues, la teoría de bandas resuelve las inconsistencias fundamentales en el modelo de electrones libres, porque permite justificar porque unos solidos son aislantes y otros metálicos, el carácter aislante o conductor resulta estar relacionado con el llenado de las bandas, y no con la valencia del elemento correspondiente. Además, permite identificar los constituyentes del gas de electrones, denominados electrones de conducción, estos son los que pueblan la última banda parcialmente ocupada”* (Melendez Ramirez, 2012).

De forma que, se tiene que los metales son aquellos materiales los cuales, poseen electrones libres y al aplicar energía en forma de campo eléctrico, estos pasan a la Banda de conducción y por tanto se produce la corriente eléctrica. Además, si se aumenta la temperatura del metal, aumenta su resistencia por el aumento de las vibraciones reticulares. Los materiales semiconductores son aquellos que a una temperatura ambiente se comportan como aislantes y sus electrones se encuentran ligados debido a una brecha de energía llamada GAP, que se encuentra entre la Banda de valencia y de conducción, por tanto, si se aumenta la energía la cual está en relación con la energía de Fermi<sup>15</sup>, en el semiconductor los electrones pasan a la banda de conducción. Por último, en materiales aislantes sus electrones están fuertemente ligados al átomo por lo que la energía necesaria para poder hacer que estos sean electrones de conducción está muy por encima de la resistencia del material.

<sup>15</sup> Se define Energía de Fermi  $E_F$  como la energía del nivel lleno más elevado en estado fundamental del sistema de N electrones (Kittel, 1998).

A través de lo presentado se puede establecer que, el fenómeno de la Corriente eléctrica y la Conducción eléctrica, a unos años de que terminara el siglo XIX, se describía apenas con las consecuencias macroscópicas que se observaban en los fenómenos, siendo la parte microscópica apreciaciones o aproximaciones, es decir, ideas que permitían poder describir lo que sucede internamente en un conductor al momento del paso de la corriente eléctrica a través de él. En este aspecto fue fundamental el descubrimiento del electrón por parte del experimento de Joseph John Thomson, que dio pie a que se construyeran modelos teóricos que permitieran darles sentido a la descripción a la parte microscópica de los fenómenos de la corriente eléctrica y la conducción eléctrica y además demostrara como esto influía en la parte macroscópica.

Aunque en un inicio los modelos teóricos presentaran inconsistencias con la parte experimental, fue gracias al avance teórico de la física cuántica y a la mirada de nuevos pensadores, los cuales se encargaban de continuar con el estudio, que permitió que estos modelos se fortalecieran y llegaran a tener una mayor consistencia y coherencia entre lo experimental y lo teórico.

Por otra parte, se logra llegar dar una respuesta a las preguntas que habían surgido en otras épocas y de las cuales no se habían resuelto. Una de estas por ejemplo es: ¿qué es lo que hace que un material sea conductor y otro aislante? A lo que se puede responder que los sólidos presentan distintas propiedades y comportamientos, debido a que internamente poseen distintas configuraciones, tanto en las estructuras atómicas como en la red cristalina, lo que en consecuencia genera que tengan diferentes valores de Gap entre la Banda de valencia y la de conducción. Por lo cual, la conducción eléctrica depende en gran medida de dichas características, de modo que, un material con un Gap muy pequeño o inexistente se encuentra que puede conducir la corriente eléctrica con mayor facilidad que otros, además, de la existencia de materiales que no lo puedan hacer debido a tener una brecha de energía muy grande entre las dos Bandas antes mencionadas.

Otra de las preguntas se refiere a ¿qué es la corriente eléctrica? Una aproximación es describirla como una forma de energía que excita a los electrones internos de los materiales, pero no a todos los electrones, si no aquellos que se encuentren en la Banda de valencia y de conducción, lo que generará que, si la energía es suficiente, los electrones se verán acelerados y se moverán internamente en el material, transportando esta energía. Cabe aclarar que, desde este contexto al hablar de flujo de corriente se está refiriendo al movimiento de cargas eléctricas por unidad de área, que dependerá de la forma y tamaño del conductor, sin embargo, cuando se establece el fenómeno de la chispa, este movimiento de cargas dependerá del dieléctrico (por ejemplo el aire) y de las propiedades de este, por lo cual el flujo aquí no se describiría específicamente por un área particular, sino por el camino que toma el movimiento de cargas en el dieléctrico.

En el caso de los metales, los electrones no requieren mayor energía para poder ser acelerados, a diferencia del material semiconductor en el que será necesario una mayor energía para poder tener electrones en la banda de conducción y transportar la energía eléctrica, por último, si el material es aislante este no tendrá las cualidades necesarias para transportar la energía eléctrica ya que sus electrones están fuertemente ligados a los átomos.

Aunque se haya logrado construir una base teórica robusta y fuerte para describir los fenómenos de la corriente eléctrica y la conducción eléctrica, aún quedaban fenómenos que no eran del todo comprendidos, uno de ellos por ejemplo es el fenómeno de la corriente superconductor en los materiales superconductores, ya que los modelos teóricos construidos no contaban con lo necesario para describir y comprender dicho fenómeno.

## CAPITULO 4: LOS PARES DE COOPER EN EL FENÓMENO DE LA SUPERCONDUCTIVIDAD.

Desde el siglo XIX diferentes físicos se habían dedicado a realizar experimentos con el objetivo de poder comprender cuál es el comportamiento de la resistencia eléctrica con respecto al cambio de temperatura, de este modo lo expone Maxwell a lo largo del último capítulo de la segunda parte de su Tratado, el cual se titula *Sobre la resistencia eléctrica de sustancias*. Maxwell describe qué implicaciones tuvieron los experimentos para tratar de definir la unidad de la resistencia eléctrica, el *Ohmio*. Además, de exponer los experimentos realizados por algunos físicos como Weber, W. Thomson y otros. Estos experimentos consistían primero en elegir un material de forma adecuada y determinar su resistencia eléctrica de la manera más precisa posible, luego se empezaba a analizar el comportamiento de la resistencia eléctrica del material variando su temperatura, es importante reconocer que los rangos de experimentación para la época en la temperatura estaban desde valores un poco más abajo del punto de congelación hasta los  $350^{\circ}$ .

Tras los distintos experimentos se llegan a la siguientes apreciaciones: en las sustancias que son metálicas se tiene que la conducción no genera ningún tipo de descomposición ni alteración química, en estos casos la resistencia eléctrica aumenta a medida que aumenta la temperatura; En las sustancias electrólitos, la conducción si está asociada con la descomposición y la resistencia eléctrica disminuye a medida que aumenta la temperatura; En los gases no se logra un mayor análisis lo único que se menciona es que para generar la conducción en gases se requiere de poderosas fuerzas electromotrices, y por último, en los dieléctricos la resistencia en un principio es muy grande pero que disminuye a medida que aumenta la temperatura. Uno de los casos en los que se buscó poca resistencia en los metales fue para el uso del telégrafo, ya que esto permitiría mejorar su funcionamiento, fue el Dr C.W. Siemens quien experimento con rangos de temperaturas en metales (Maxwell, 1873).

Entre las conclusiones a las que llego el Dr. Siemens se encuentran las siguientes: las aleaciones siempre presentan más resistencia que los materiales puros, en los experimentos con el mercurio cercanos pero menores al punto de congelación del agua, se llegó a una resistencia mínima de 0.96146 ohmios, donde se tenía como referencia que a  $0^{\circ}$  es de 13.071 ohmios, siendo estas la mínimas temperaturas y resistencias descubierta para la época.

Un tiempo más adelante en el año de 1911, tras perfeccionar las estrategias para disminuir la temperatura, se encuentran los trabajos realizados por Heike Kamerlingh Onnes, él cual logra licuar el Helio, esto le permitió llegar a temperaturas cercanas al cero absoluto ( $0K$ ). Con lo cual se dedicó a medir la resistividad de distintos metales a estas bajas temperaturas. En consecuencia, tras trabajar con el Mercurio a una temperatura de  $4.2 K$ , descubrió que este conduce la corriente eléctrica sin resistencia, la relación entre la resistencia y temperatura del Mercurio se muestra en la gráfica construida por Kamerlingh en la Ilustración 19. Carlos

Sanchez menciona en su libro de Física cuántica lo siguiente alrededor del experimento con helio: “No con una resistencia despreciable pequeña, sino con resistencia cero” (Sanchez del Rio, 2015)

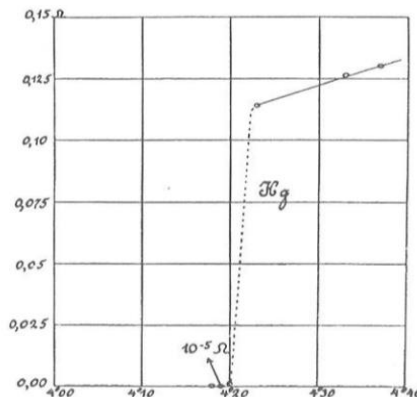


Ilustración 19: Muestra original de Kamerlingh Onnes 1911, resistencia frente a temperatura absoluta para el mercurio (Melendez Ramirez, 2012)

Así de este modo gracias a los experimentos de Kamerlingh se descubre lo que se denomina el fenómeno de la superconductividad. El cual consiste en que a una cierta temperatura crítica ( $T_c$ ) algunos sólidos sufren una *transición de fase*, así lo describe Meléndez, en la cual su resistencia eléctrica pasa a ser cero (Melendez Ramirez, 2012).

Dado su comportamiento y características tan inusuales surgen un conjunto de preguntas al respecto de este fenómeno como las siguientes: ¿Cómo funciona internamente la corriente y la conducción superconductor? ¿Qué es lo que hace que un sólido sea un superconductor? Es así como desde este momento se comienzan a realizar una serie de experimentos para poder comprender el comportamiento de la superconductividad, en estos descubren que el número de elementos y materiales superconductores es bastante grande (Sanchez del Rio, 2015).

Para el año de 1913 se descubre que la superconductividad no solo es consecuencia de una  $T_c$  sino también es necesario que el sólido, no se encuentre expuesto a un campo magnético crítico  $H_c$ , ya que este también destruye el estado de conducción perfecta. Un tiempo más adelante en el año de 1933, los físicos Walter Meissner y Robert Ochsenfeld descubren que la resistividad nula no es la única característica que presentan estos sólidos en su estado superconductor, ya que también descubren que estos se comportan como un diamagnético perfecto, expulsando todo el flujo magnético del interior del sólido, generando el fenómeno de la levitación magnética por superconductividad. Teniendo en cuenta esta última relación, Sánchez del Rio afirma lo siguiente: “Tenemos así el primer indicio de que las interacciones superconductividad-magnetismo desempeñan un papel primordial en los fenómenos superconductores” (Sanchez del Rio, 2015). Es preciso resaltar que el objetivo del presente trabajo se centra en el fenómeno de la conducción, por lo que no se abordará nada respecto a la relación con el magnetismo, sino solo con lo que sucede internamente en un superconductor en el

momento que se le aplica un campo eléctrico generando el fenómeno de la corriente superconductor.

Considerando que para el año de 1913 se descubre el fenómeno de la superconductividad, en este momento se contaba con el modelo teórico de gas electrones de Drude y Lorenz para dar explicación a los fenómenos de la corriente eléctrica y conducción eléctrica. En este modelo no se encontraron las herramientas necesarias para poder estudiar el fenómeno de la superconductividad. Tiempo después se presenta el modelo de Sommerfeld de Electrones libres, en el que no se evidencia la intención de desarrollar dicho fenómeno. Por último, se publica el trabajo de Bloch, quien, si se encuentra interesado con el fenómeno de la superconductividad, pero es consciente de que su trabajo no posee el alcance suficiente para poder abarcar este fenómeno tan inusual. Es así como Bloch afirma que para la fecha en la que publica su trabajo de doctorado, no se encuentra una explicación del fenómeno de la superconductividad (Bloch, 1929).

La superconductividad era el tema principal en los años siguientes de la publicación del trabajo de Bloch, el cual había tenido gran éxito en la descripción de los fenómenos de la corriente eléctrica. Hofstadter con respecto al trabajo de Bloch menciona “*su trabajo contiene una teoría de la conductividad eléctrica en los metales normales, y uno de los resultados se refiere a la resistencia de los metales a baja temperatura*” (Hofstadter, 1994). Con respecto a estos resultados Bloch menciona lo siguiente: “*Los metales tienen comportamientos diferentes a bajas temperaturas*” (Bloch, 1929). De este modo, es como Pauli se preocupa por llegar a comprender y describir la superconductividad, y le pide a Bloch que trabaje junto a él para poder resolverlo, ya que nadie lo había hecho antes. Tras estudiar la superconductividad con Pauli basado en su teoría, Bloch pudo ver que necesitaba algo nuevo para explicar la superconductividad, de esta manera es como lo relata Hofstadter, quien menciona que tras el análisis realizado por Bloch acerca de la superconductividad le dijo lo siguiente: “... *hace falta algo nuevo para explicar la superconductividad*” y después agrega “... *la superconductividad no podía resultar de un enfoque que utiliza electrones individuales*”. Por lo que Bloch es consciente que el problema no era tan fácil como Pauli pensaba (Hofstadter, 1994).

El Fenómeno de la superconductividad generaba un gran atractivo en la comunidad científica, dado sus comportamientos tan peculiares, pero para el año de 1950, ningún físico había tenido éxito en desentrañar sus secretos y poder comprender y describir la superconductividad, por lo que ninguno obtuvo resultados apreciables. Entre los grandes físicos que se embarcaron por este camino se agrupan en dos generaciones distintas: la primera generación conformada por Albert Einstein, Niels Bohr, Ralph Kronig, Lev D. Landau, Félix Bloch y León Briollin y la segunda generación John Barden, Werner Heisenberg, Fritz London, Max Born, Herbert Fröhlich y Richard Feynman. Un ejemplo de estos esfuerzos en describir la superconductividad es el teórico británico Hébert Fröhlich el cual menciona que “*el efecto físico clave debe ser un cambio inducido por fonones en la energía propia de reacción de los electrones cercanos*” (Cooper & Feldman, 2011), pero no demostró cómo esto tenía coherencia con fluir sin resistencia o con el diamagnetismo perfecto.

Unos años más adelante en 1957 un grupo de tres físicos John Bardeen, León N. Cooper y John Robert Schrieffer, lograrían construir lo que sería la primera teoría aceptada para describir el fenómeno de la superconductividad, la cual se denominó, como la *Teoría BSC* en honor a estos científicos. Cada uno de ellos aportó significativamente en la consolidación de dicha teoría, pero el que tuvo más impacto con respecto a describir el comportamiento de los electrones en el estado superconductor fue Cooper.

Cooper comienza a trabajar en la Superconductividad a comienzos del año de 1955, gracias a que Bardeen buscaba con quien trabajar en esto, por lo que le propone hacer equipo. Por esta razón Cooper empieza a estudiar todo lo relacionado con el fenómeno de la conducción eléctrica en estado normal, y le llama la atención el modelo de partículas individuales de Sommerfeld- Bloch ya que este tenía una buena descripción de la conducción en metales, aunque incluía una mirada del comportamiento a bajas temperaturas no tenía un indicio de la superconductividad. Para poder trabajar alrededor de la teoría de Bloch, Cooper pensaba que *“debe haber un cambio cualitativo en la naturaleza de la función de onda del electrón para que funcione”* (Cooper & Feldman, 2011). Es así como su primer objetivo fue lograr la modificación de la función de onda del electrón, aunque no llegó a ningún resultado. Para continuar con su estudio Cooper se plantea la siguiente pregunta: ¿si la interacción de Coulomb está presente en todos los metales, por qué solo algunos se convierten en superconductores? A la base de esta pregunta, están los análisis que había realizado Cooper de las teorías anteriores, donde en estas siempre se había omitido la interacción electrón – electrón, por consiguiente, Cooper genera la siguiente hipótesis: *“... la superconductividad se debe producir por una interacción entre electrones, que implique un cambio energético de ordenes de magnitud menores a la energía de Coulomb  $10^{-8}$  eV/atomo”* (Cooper & Feldman, 2011). De este modo a lo largo de septiembre de 1956 realiza un exhaustivo estudio con matrices y simetría en la función de onda, considerando el intercambio de fonones cerca de la superficie de Fermi<sup>16</sup>. Este estudio lo lleva a un resultado que lo sorprendió, ya que según estos resultados se hacen pares de electrones con spin cero y una interacción atractiva, además entre los resultados encontró que la energía en estado superconductor compuesto por pares ligados sería proporcional a  $(\hbar\omega)^2$ . Con respecto a estos resultados Cooper menciona lo siguiente: *“Parecía claro que, si de alguna manera el estado superconductor pudiera estar compuesto de tales pares, se tendría un estado con propiedades cualitativamente diferentes del estado normal, con el estado superconductor probablemente separado por una brecha de energía”* (Cooper & Feldman, 2011). Tras encontrar esta energía Cooper se convenció de que estaba en el camino correcto.

Lo siguiente que tenía que hacer Cooper era poder consolidar la función de onda para incorporar los pares de electrones, por lo que se preguntaba cómo funcionaba ese estado ligado. De hecho, se refería a él como *“Estado extraño ligado”*, el cual debía cumplir con una energía específica.

---

<sup>16</sup> La superficie de Fermi es la superficie de energía constante  $E_F$ , en el espacio K. La superficie de Fermi separa los orbitales que no están llenos de los que, si lo están, además determina las características eléctricas porque la corriente se debe a cambios en la ocupación de los estados cercanos a esta superficie (Kittel, 1998).

Para realizar esta consolidación dedicó mucho tiempo a demostrar las características cualitativas de los pares, pero no lo logró.

Tras asistir Cooper a una conferencia de Richard Feynman, en la que se desarrollaba el tópico de superconductividad, cuenta que *“me acerqué y le dije que había resuelto el problema de la superconductividad, luego le explique mis ideas”*, de lo cual inmediatamente no recibió una respuesta pero después, se publicó el informe de la conferencia, en esta menciona Feynman que no cualquiera puede trabajar en la superconductividad, por ello los que no son demasiado listos no podrían hacerlo (Cooper & Feldman, 2011). Por otro lado, Cooper al enterarse que Feynman también estaba trabajando alrededor de la superconductividad lo motivó a seguir con su trabajo.

Para este tiempo a comienzos de 1957, se encontraban los tres trabajando en la oficina de Bardeen, y Schrieffer logra incorporar en la función de onda los pares de electrones satisfaciendo las condiciones requeridas. De este modo tras el visto bueno de Bardeen entre los tres decidieron escribir el artículo sobre la Superconductividad. En marzo de 1957, expusieron sus resultados en dos artículos en la reunión de la Sociedad Estadounidense de Física. Tras la valoración de la comunidad, se encontraron que quedaron aspectos por solucionar o argumentar como la dependencia del momento entre los electrones y el efecto Meissner.

Con respecto a la demostración de la dependencia del momento en el par de electrones recibieron ayuda del físico Philip Warren Anderson, y un tiempo después tras solucionar los otros problemas se envió el artículo terminado el 8 de julio de 1957 a Physical Review.

Tras la publicación de trabajo de Bardeen, Cooper y Schrieffer, la comunidad científica sintió que el problema de la superconductividad había sido resuelto, lo cual fue muy alentador, a lo que Bloch dice: *“... el apareamiento de electrones era la idea correcta, que se necesitaba para resolver la superconductividad”* (Hofstadter, 1994). Por otro lado, hubo quienes se sintieron decepcionados y la respuesta de Cooper fue la siguiente *“No llegamos a una nueva ley de la naturaleza ya que, por supuesto el fenómeno de la superconductividad es sorprendente, si no que llegamos a una pequeña interacción entre electrones y átomo en la red”* y para terminar agrega:

*“La clave fue extraer al menos una característica cualitativa del estado superconductor que fuera sorprendentemente diferente del estado normal, para nosotros fue la brecha energética. Al concentrar nuestra atención en cómo podría surgir tal brecha en un sistema degenerado de electrones en interacción, descubrimos el nuevo estado superconductor”*  
(Cooper & Feldman, 2011)

Las características que ofrece la teoría BSC para describir la superconductividad, se pueden resumir en 5 aspectos claves según Charles Kittel que menciona en su texto *Introducción a la Física de estado Sólido* (Kittel, 1998):

1. Interacción atractiva entre electrones que se encuentra en el estado superconductor separados por una brecha de energía prohibida.

2. La interacción electrón-red-electrón, a partir de un conjunto de par de electrones con la unidad efectiva de  $2e$  y con vectores de onda  $k \uparrow$  y  $-k \downarrow$  además de que estos pares se comportan como bosones.
3. Demostración de la descripción del efecto Meissner bajo la ecuación de London.
4. Predecir qué elementos o compuesto son más probables de ser superconductores a bajas temperaturas, a partir de estudiar el nivel de Fermi y la interacción electrón-red a temperatura ambiente.
5. Predice la cuantización del flujo magnético.

Considerando la primera característica surge la siguiente pregunta ¿cómo funciona esa fuerza atractiva entre electrones? o ¿por qué se considera atractiva? Feynman menciona lo siguiente: “*Resulta que, debido a las interacciones de los electrones con las vibraciones de los átomos de la red, hay una pequeña atracción efectiva resultante entre los electrones*” (Feynman, 2005), además, para poder responder a esto en el presente trabajo se utilizó el texto de Meléndez que desarrolla la teoría en el capítulo 11 llamado *superconductividad* (Melendez Ramirez, 2012).

Primero es importante aclarar que el conjunto de dos electrones enlazados mediante intercambio de fonones se denomina par de Cooper, a cada electrón se le asociara un vector de onda  $k_1$  y  $k_2$ . Estos se mueven a través de la red; el primer electrón llevará una velocidad máxima y emitirá un fonón, lo cual significa que interactúa con una partícula reticular, visto matemáticamente se ve de la siguiente forma  $k'_1 = k_1 - q$  donde  $k'_1$  es el estado del electrón tras emitir el fonón  $q$ . El papel que desempeña la partícula reticular es ser como un “*intermediario*” ya que como el momento neto de la red no varía, absorbe y emite el fonón instantáneamente, y este interactúa con el segundo electrón de modo que  $k'_2 = k_2 + q$ , donde  $k'_2$  es el estado del electrón al absorber el fonón proveniente de la red. En conclusión, el primer electrón emite un fonón y el segundo lo absorbe, esto se representa en la Ilustración 20 a partir de los diagramas de Feynman, además, la conservación del momento en el par de Cooper se cumple ya que la suma es constante, donde  $k_1 + k_2 = k'_1 + k'_2 = K$  donde  $K$  es el momento del par de Cooper. Entonces si se observa detenidamente, el primer electrón al emitir el fonon, disminuye su velocidad y el segundo electrón al absorber el fonon aumenta su velocidad, en conjunto se ve que se están acercando por lo que se considera una fuerza atractiva, o fuerza coulombiana negativa.

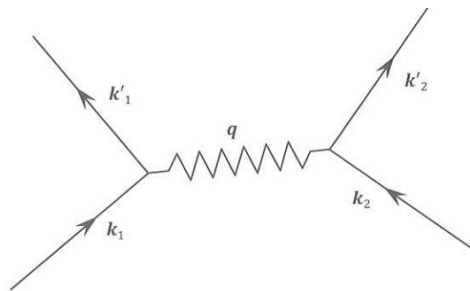


Ilustración 20: Diagrama de Feynman para la interacción electrón – electrón mediante intercambio de un fonón (Melendez Ramirez, 2012)

Otra pregunta que surge es ¿por qué se atraen y no se repelen? Esto es debido a que entre ellos hay una distancia de  $1000 \text{ \AA}$  (*armstrongs*) y la repulsión coulombiana es insignificante entre los electrones de un par de Cooper (Melendez Ramirez, 2012).

Continuando con la segunda conclusión, ¿por qué un par de Cooper se puede considerar como un bosón? Para los electrones en un par de Cooper sus vectores de onda son iguales en modulo pero con sentido opuestos, de modo que  $k_1 = -k_2$ , además, poseen espines opuestos  $k \uparrow, -k \downarrow$  donde las flechas denotan el estado del espín de cada electrón, por lo que cuando se realiza el apareamiento entre ellos genera un conjunto singlete<sup>17</sup>, es por ello que se considera un apareamiento ya que cumplen con esta condición (Melendez Ramirez, 2012), Por otro lado, Feynman también agrega con respecto a esto lo siguiente: “*ahora bien saben ustedes que el electrón es un fermión, pero un par ligado actuaría como un bosón*” (Feynman, 2005).

Otro aspecto que es importante desarrollar se encuentra enunciado también en la primera característica de Kittel, con respecto a la existencia de una brecha de energía prohibida. Primero hay que aclarar que esta brecha de energía tiene un comportamiento distinto a la que se utilizaba en la teoría de bandas para un aislante, ya que allí se refieren a una interacción entre electrón y la red, en el caso de la superconductividad es debido a la interacción entre electrón – electrón, es decir esta brecha prohibida es propia del fenómeno de la superconductividad, la cual ordena a los electrones en el espacio k respecto al gas de electrones de Fermi (Kittel, 1998). Ahora para poder diferenciar por qué en un metal la energía de Fermi se refiere a la energía necesaria para poder excitar un electrón, y en un superconductor la energía de Fermi está asociada con la banda prohibida se muestra la siguiente Ilustración 21.

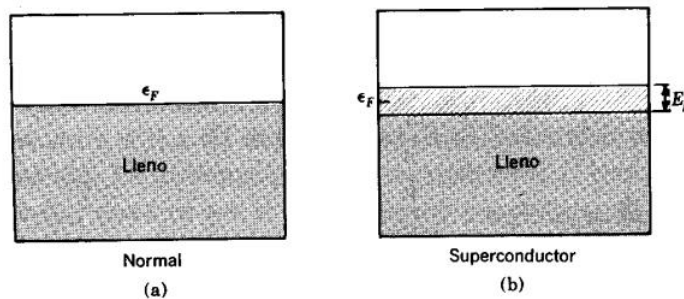


Ilustración 21 a) Banda de conducción en el estado normal. b) banda prohibida de energía en un superconductor,  $E_g$  se exagera en la figura, su valor está alrededor del orden  $E_g \sim 10^{-4} \epsilon_F$  (Kittel, 1998)

La banda de energía prohibida, en el estado superconductor, se refiere a que si los electrones están por encima de la banda estos se comportan como electrones normales, por otro lado, los electrones por debajo forman pares, lo cual genera la conducción perfecta.

<sup>17</sup> Dos o más partículas que se encuentre en estados entrelazados de forma tal que la suma total de momentos angulares de ese estado es cero, es por esto se le considera un bosón y se le trata como tal en la función de onda del par de Cooper

Por último, La teoría BSC permite identificar la densidad de corriente a través de un superconductor el cual no ofrece resistencia eléctrica al paso de la corriente, y se describe con la siguiente expresión:

$$J_s = -n_s e v = -\frac{n_s e \hbar}{m_e} K \quad \text{Ecuación 14}$$

Aquí  $n_s$  es el número de electrones por unidad de volumen,  $v$  es la velocidad promedio y  $K$  el vector de onda promedio, además es importante recalcar que en un superconductor no todos los electrones están apareados, estos se destruyen a medida que aumenta la temperatura (Melendez Ramirez, 2012).

La teoría BSC, logro comprender y describir el fenómeno de la superconductividad, desentrañando lo secretos que muchos físicos intentaron encontrar. Su solución permitía avanzar en el entendimiento y utilización para el desarrollo tecnológico, como ocurre hoy en día donde se utiliza en una gran cantidad de funciones como los trenes de levitación MAGLEV, o en la aceleración de partículas.

En la Superconductividad la conducción eléctrica pasó de darse mediante electrones individuales a electrones en pares con nuevas características y comportamientos. Además, al no existir una oposición al movimiento de estos electrones ligados, ya que la interacción es de electrón a electrón y no con la red, no se evidencia el efecto de desprendimiento de calor de Joule, por lo que la corriente es transportada mediante los pares de electrones sin ninguna pérdida de energía.

## **CONSIDERACIONES PEDAGOGICAS**

En la investigación realizada se hizo un estudio y análisis de la evolución histórica de los conceptos de corriente eléctrica y conducción eléctrica, en esta se abordaron diferentes trabajos elaborados por físicos que se embarcaron en la labor de estudiar, entender y comprender tanto teórica como experimentalmente el fenómeno de la corriente eléctrica y la conducción eléctrica, los cuales desde su experiencia y conocimiento buscaban llegar a una descripción completa. Además, se buscó demostrar que el trabajo realizado por los primeros científicos fue la base para que otros pudieran continuar con este camino, que las problemáticas que enfrentaron, sus intenciones y sus propuestas tuvieron impacto para consolidar un conocimiento fuertemente sustentado de la corriente eléctrica.

Por otro lado, los criterios utilizados en la selección de documentos y trabajos pertinentes en esta investigación, fue que desarrollaran aspectos claves como: el descubrimiento de la corriente eléctrica y sus primeras interpretaciones al respecto, cuestiones frente a la naturaleza, preguntas e hipótesis de las características internas de los materiales que les permitiera tener un comportamiento con propiedades tales como conducir o aislar la corriente eléctrica, también descubrimientos significativos que marcarían un cambio sustancial en la evolución del estudio de dichos fenómenos.

Es por esta razón que para poder mostrar de forma condensada el trabajo aquí realizado, se construye una síntesis que tiene la intención de ser abordada de manera sencilla, por maestros en formación o docentes, que busquen fortalecer las clases de electromagnetismo, física de estado sólido o superconductividad en las que desarrollen temas alusivos a la corriente eléctrica y la conducción eléctrica, teniendo presente que el aspecto fuerte de este trabajo es demostrar que los conceptos son una construcción histórica, resultado de las contribuciones de diferentes científicos y científicas de distintas épocas que aportaron desde sus saberes para construir el conocimiento, y no son conceptos absolutos definidos por un ser superior.

Además, para aquellos interesados en abordar más a fondo el tema desarrollado en la síntesis se les invita a consultar el trabajo completo.

## ANÁLISIS Y CONCLUSIONES

- Al abordar los trabajos realizados por los primeros pensadores que se embarcaron en la labor de comprender y describir el fenómeno de la electricidad, desde su perspectiva y experimentos, se logró analizar las primeras explicaciones alrededor de corriente eléctrica y conducción eléctrica. A sí mismo, esto permitió identificar los hechos más relevantes que contribuyeron en la evolución de los experimentos y la comprensión de la electricidad, destacando los dispositivos de la Jarra de Leyden y la Cadena Galvánica y los experimentos de Franklin, Coulomb, Ohm y Joule, que dan la primera formulación teórica de la corriente y sus implicaciones con la temperatura hasta el siglo XIX. Todos estos brindan aportes que modifican la mirada frente a la electricidad y la conducción eléctrica, enriqueciendo su comprensión y descripción. Esta variedad en las formas de enfrentarse al problema permite identificar cómo los científicos proponen sus ideas en búsqueda de la construcción de conocimiento, lo cual evidencia de forma dinámica la manera en que se construyen las teorías.
- Se logró reconocer que, para mediados del siglo XIX, existía gran variedad de modelos teóricos que buscaban cómo describir los fenómenos de la corriente eléctrica y la conducción eléctrica, sobresaliendo dos miradas de estas: desde la corriente como fluido que se transfiere y la corriente como movimiento de partículas. De acuerdo con lo anterior, el trabajo de Maxwell en su Tratado de Electricidad y Magnetismo permitió hacer un análisis objetivo sobre los distintos modelos, pero no consigue establecer un modelo unificado. Se encontró que, fue gracias al descubrimiento del electrón por parte del físico experimental J.J. Thomson que los modelos teóricos que iban por la línea del movimiento de partículas conductoras prevalecieron sobre los que hablaban alrededor de la transferencia de los fluidos eléctricos. Y, en definitiva, tras el análisis de estos dos aspectos específicos, se logra describir las causas que llevaron a establecer una sola mirada sobre los fenómenos de la corriente eléctrica y conducción eléctrica.
- Al identificar que la corriente eléctrica, modelada como un movimiento de partículas a través de un conductor, se convierte en la base para que algunos físicos de comienzos del siglo XX hayan podido construir sus modelos teóricos sobre el estudio de los fenómenos de la corriente eléctrica y la conducción eléctrica, se destaca el papel del modelo de Drude del gas de electrones, el cual poseía una mirada clásica de la corriente eléctrica. Sin embargo, este modelo se modifica bajo la influencia de otros científicos y de la mecánica cuántica, de modo que el modelo tomó más robustez y coherencia entre lo experimental y lo teórico. Posteriormente se encontró que hay una transición evolutiva del modelo de gas electrones, el cual cambió para ser el modelo de electrones libres, después de ello, gracias al trabajo de Bloch pasa a ser un modelo de electrones cuasi libres con características cuánticas y por

último se establece un modelo desde la teoría de Bandas. Tras realizar este análisis, se logra observar que los modelos teóricos construidos, resuelven en gran parte las problemáticas que se habían generado desde muchos años atrás con respecto a la explicación de los fenómenos de corriente eléctrica y conducción eléctrica, como cuál era la naturaleza de la corriente eléctrica, las características de los materiales conductores, semiconductores y aislantes, además caracterizar la importante relación de los fenómenos eléctricos con la temperatura.

- Al hacer una reconstrucción histórica desde del descubrimiento de la superconductividad, hasta el establecimiento de la teoría BSC con sus respectivas características, se logró presentar una aproximación a la descripción de la corriente superconductor, problema que permanecía sin explicación incluso desde la teoría de bandas. Puntualmente es la idea de los Pares de Cooper la que permite entender las características de la corriente en el estado superconductor y la cual se construyó con base en los desarrollos propuestos para la conducción eléctrica en un estado “normal”, establecida a lo largo de la teoría propuesta por Bloch. La Teoría BSC logra dar la descripción para lo que se denomina un conductor perfecto, algo que algunos científicos del siglo XVIII habían atribuido a los metales, pero que realmente es hasta el desarrollo de la física moderna y del fenómeno de la superconductividad que logra sustentarse alrededor de un material con estas características.
- La metodología cualitativa utilizada en este trabajo investigativo permitió realizar un acercamiento en pro de estudiar, interpretar y comprender a profundidad la evolución histórica del fenómeno de la electricidad, enfocada en los conceptos de corriente eléctrica y conducción eléctrica, además se logró identificar otros factores físicos que estuvieron involucrados en el desarrollo de la teoría, como lo son la temperatura, el descubrimiento del electrón y el fenómeno de la superconductividad, de modo que se logró dar cuenta de este proceso. Adicionalmente la técnica utilizada del análisis documental permitió llevar un proceso sistemático de indagación, recolección de información, interpretación y análisis de trabajos que en su mayor parte son fuentes primarias, pero también se utilizaron fuentes secundarias, en torno al tema de los fenómenos asociados a la corriente eléctrica y conducción eléctrica.
- Se logra realizar una síntesis organizada como anexo al documento, que presenta en gran medida las ideas principales desarrolladas en este trabajo, en las que se involucran las concepciones de los autores que se abordaron, además de la interpretación que se construyeron a partir del análisis realizado, lo que permitió que se pudiera organizar el producto que brinda comodidad y practicidad para aquellos maestros en formación o docentes en práctica del área de la física, que deseen indagar sobre el tema de la historia de los conceptos de corriente eléctrica y conducción eléctrica el cual les dará una primera mirada sobre este tema.

- En el trabajo realizado a partir de una reconstrucción histórica significativa, desde la física clásica hasta la física moderna, enfocada en los conceptos de conducción eléctrica y corriente eléctrica, se logró realizar una revisión a la evolución de dichos conceptos, desde la interpretación clásica y la moderna, en la que se analizó desde la mirada de distintos físicos con sus trabajos tanto teóricos como experimentales, y como estos buscaban la forma de poder comprender y describir los fenómenos asociados a la corriente eléctrica, además que demostró que sus trabajos fueron fundamentales para el desarrollo del conocimiento científico. Por otro lado, cabe recalcar que la investigación se puede fortalecer de dos maneras distintas: Una de ellas, es aumentar el estudio sobre la cantidad de físicos que trabajaron alrededor de dichos fenómenos, ya que, aunque en la investigación se abordaron algunos, no se logra hacer el acercamiento a todos los involucrados; Otra forma consiste en darle al trabajo un desarrollo más disciplinar, en búsqueda de potenciar la formalización matemática, por lo cual este documento queda como material de base para futuras investigaciones.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Alan Herries, W. (1980). Opportunities Missed and Oportunities Seized. Gran Bretaña.
- Bloch, F. (1929). Über die Quantenmechanik der Elektron in Kristallttern. 52, 555-600. Zeitschrift für Physik. doi:10.1007/BF01339455
- Camelo Bustos, F. J., & Rodriguez Sotelo, S. J. (2008). Una revisión histórica del concepto de calor: . Tecné, Episteme y Didaxis N.º 23.
- Cooper, L., & Feldman, D. (2011). BSC: 50 years. Singapur: World Scientific Publishing.
- Coulomb, C. (1785). Abhandlungen über die Elektrizität und den Magnetismus. *Aus: Histoire et Memories de l'Académie royale des sciences 1785*, 569-577. (W. König, Trad.) OSTWALD'S KLASSIKER DER EXAKTEN WISSENSCHAFTEN .
- Drude, P. (1900). Zur Electronentheorie der metalle. 306, 566-613. doi:https://doi.org/10.1002/andp.19003060312
- Einstein , A. (1906). *Die Planckshe theorie der Strahlung und die Theorie der spezifischen Wärme* . Berna.
- Feynman, R. (2005). The Feynman LECTURES ON PHYSICS. Quantum Mechanics. *III, New Millennium Edition*. (B. Books, Ed.)
- Francois de Cisternay, D. C. (1733). *A Discourse Concerning electricity*. Philosophical Transactions.
- Franklin, B. (1746-1756). *The Works of Benjamin Franklin*. Filadelfia: G.P. Putnam´s sons, 1904. Obtenido de <https://oll.libertyfund.org/title/franklin-the-works-of-benjamin-franklin-in-12-vols>
- Franklin, B. (1909). The Autobiography of Benjamin Franklin. *WITH INTRODUCTION AND NOTES EDITED BY CHARLES W. ELIOT*. (P. S. University, Ed.) NEW YORK.
- García Martínez, A. (2005). *Aporte del estudio histórico de intrumentos científicos a la formación del profesorado en ciencias*. Barcelona: ENSEÑANZA DE LAS CIENCIAS, 2005. VII CONGRESO.
- Gonzales, E. M., Muños Burbano, Z., & Solbes , j. (2020). *La enseñanza de la física cuántica: una comparativa de tres países*. . enseñanza y aprendizaje de las ciencias, Góndola. doi:https://doi.org/10.14483/23464712.15619

- Hofstadter, R. (1994). Felix Bloch 1905-1983 (Biographical Memoir). (N. A. Sciences, Ed.) Washington D.C.
- Ibar Romero, J. (2006). *La historia de la electricidad*. Cordoba: EPEC. Recuperado el 2 de Septiembre de 2022, de <https://web.epec.com.ar/docs/educativo/institucional/historia.pdf>
- Joule, J. (1840). *On the Heat evolved Metallic Conductors of the Electricity, and in the Cells of a Battery during Electrolysis*. Royal Society . Philosophical Magazine.
- Kittel, C. (1998). Introducción a la FÍSICA DE ESTADO SÓLIDO. España: Reverte, S.A.
- Martinez, R. (1999). *La teoria de la radiación del cuerpo negro*. Bogota: Universidad Nacional de Colombia .
- Mass, M. (1891). Editor's Preface. En G. Ohm, *The Galvanic Circuit Investigated Mathematecally* (pág. 8). Berlin.
- Maxwell, J. C. (1873). *A tratise on Electricity and magnetism* (Vol. 1). London : Oxford at the calderon press.
- Melendez Ramirez, J. J. (2012). *Física del estado Solido*. (U. d. Extremadura, Ed.) España.
- Ministerio de Educacion Nacional. (2006). *Estandares Basicos de Competencias en Lenguaje, Matematica, ciencias y Ciudadanias*. Colombia: MEN. Obtenido de [https://www.mineducacion.gov.co/1621/articles-340021\\_recurso\\_1.pdf](https://www.mineducacion.gov.co/1621/articles-340021_recurso_1.pdf)
- Morales, O. A. (2003). FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN DOCUMENTAL. Venezuela: Universidad de los Andes.
- Ohm, G. S. (1827). Die Galvanische kette mathematish bearbeitet.
- Osorio, S., Ayala, M., & Malagon , J. (2013). *Construcción de fenomenologías y procesos de Formalización- Un sentido para la enseñanza de las ciencias*. Universidad Pedagógica Nacional.
- Ostermann, F., & Moreira, M. (2000). *Física contemporánea en la escuela secundaria: una experiencia en el aula involucrando formación de profesores*. Universidade Federal do Rio Grande do sul, Enseñanza de las ciencias, Brasil.
- Piccolino, M., & Bresadola , M. (2013). *Shoking frogs. Galvani, Volta, and the Electric Origin of Neurociense*. Reino Unido: Oxford university press.
- Picollino, M., & Bresadola, M. (2013). *Shocking Frogs. Galvani, Volta, and the electric origins of Neuroscience*. New York: Oxford University Press.

- Present, P. (2019). *Learning in the world, Petrus van Musshenbroek (1692-1761) and "(Newtonian) Experimental philosophy"*. Letteren en Wijsbegeerte: Vubpress.
- Pumfrey, S. (2002). Guillermo Gilberto. En P. Harman, & S. Mitton (Edits.), *Cambridge Scientific Minds*. Reino Unido: Cambridge University Press.
- Quintanilla Gatica, M. (2016). La historia de la ciencia y su aporte a la investigación didáctica, la formación del profesorado y el aprendizaje de las ciencias. Comité Editorial Científico Internacional.
- Ruiz, O. (2012). *Metodología de la investigación cualitativa*. Universidad de Deus. 5ta edición.
- Sanchez del Rio, C. (2015). *Física Cuántica*. 5. Madrid: Ediciones Piramide.
- Sánchez Ron, J. M. (1997). *J.J. Thomson y la genesis del descubrimiento del electron*. Arbor. doi:<https://doi.org/10.3989/arbor.1997.i622.1802>
- Sondheim, E. H. (1999). *Biography of Sir Alan Herries Wilson*. Londres.
- Sparkmuseum*. (s.f.). Obtenido de Conduction, Insulation and Electric Current - 1729 Stephen Gray (1666-1736) - The Discovery of Electrical Conduction and Insulation: [http://www.sparkmuseum.com/BOOK\\_GRAY.HTM](http://www.sparkmuseum.com/BOOK_GRAY.HTM)
- Stephen, G. (1720). *An Account of Some New Electrical Experimentp* (Vol. 31). Philosophical Transactions. doi:<https://dx.doi.org/10.1098/rstl.1720.0025>
- Stephen, G. (1731). *A Letter concerning the Electricity of Water to Cromwell Mortimer, M. D. Secr. R. p* (Vol. 37). Philosophical Transactions. doi:<https://dx.doi.org/10.1098/rstl.1731.0040>
- Stephen, G. (1731). *A Letter from to Dr. Mortimer, Secr. R. p.. Containing a Farther Account of His Experiments concerning Electricity* (Vol. 37). Philosophical Transactions. doi:<https://dx.doi.org/10.1098/rstl.1731.0050>
- Stephen, G. (1731). *A Letter to Cromwell Mortimer, M. D. Secr. R. S. Containing Several Experiments concerning Electricity* (Vol. 37). Philosophical Transactions. doi:<https://dx.doi.org/10.1098/rstl.1731.0005>
- Stephen, G. (1735). *Communicated in a Letter Experiments and Observations upon the Light That is Produced by Communicating Electrical Attraction to Animal or Inanimate Bodies, Together with Some of Its Most Surprising Effects to Cromwell Mortimer* (Vol. 39). Philosophical Transactions.
- Volta, A. (1792). *Tratado sobre la Electricidad Animal*. WILHELM ENGELMANN EN LEIPZI.

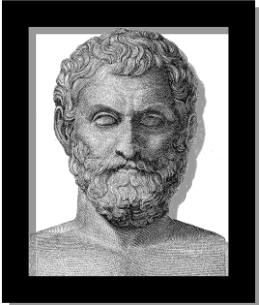
Volta, A. (1796-1800). *Investigaciones Sobre el Galvanismo*. WILHELM ENGELMANN.

## ANEXO

### **SÍNTESIS DE LAS CONCEPCIONES DE LOS CONCEPTOS DE CORRIENTE ELÉCTRICA Y CONDUCCIÓN ELÉCTRICA EN LA HISTORIA DE FÍSICA.**

Esta Síntesis es el resultado del trabajo de investigación llamado *Un estudio histórico sobre el concepto de corriente eléctrica: una aproximación de la física clásica a la física moderna*. Se espera que pueda ser utilizada por maestros en formación o docente en práctica, y les permita poder llevarla a sus clases de electromagnetismo, Física de estado sólido o superconductividad, en las que aborden temas a alusivos a la corriente eléctrica y la conducción eléctrica, teniendo presente que el aspecto fuerte de este trabajo es demostrar que los conceptos son una construcción histórica, resultado de las contribuciones de diferentes científicos y científicas de distintas épocas que aportaron desde sus saberes para construir el conocimiento, y no son conceptos absolutos definidos por un ser superior.

Además, para aquellos interesados en abordar más a fondo el tema desarrollado en esta síntesis se invita a consultar el trabajo completo.

<p><b>Tales de Mileto</b></p>  <p><b>Siglo XII A.C.</b></p>	<p>Descubrimiento del efecto Ámbar.</p> <p>Atracción y repulsión electrostática.</p> <p>Los objetos frotados obtienen una ganancia de <i>alma</i> y pueden mover a objetos inanimados.</p>
--	--

## **William Gilbert**



**1600**

Enunció que la Tierra se comporta como un imán gigante.

Menciona la independencia entre los fenómenos eléctricos y magnéticos.

Clasificó las sustancias eléctricas en: Sustancias eléctricas y aneléctricas.

## **Otto Von Guericke**



**1672**

Construyó la primera máquina electrostática.

La electricidad es un fluido que se transfiere de un cuerpo a otro.

## **Stephen Gray**



**1720 - 1735**

La electricidad se comporta como un fluido (Electrick Effluvio), además fluye por los materiales.

El fuego eléctrico es visible (la chispa).

Existen materiales comunicantes y no comunicantes del fluido eléctrico y clasificó dichos materiales.

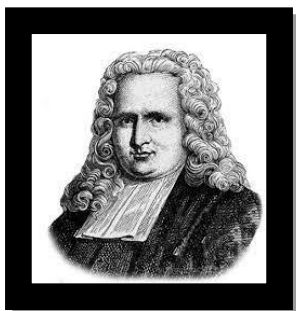
**François de  
Cisternay du Fay**



**1733**

Postuló el primer principio universal sobre el comportamiento de los fenómenos eléctricos que consiste en que: existen dos tipos de electricidades distintas que fluyen: Vitreous and Resinous Electricity (Electricidad Vítreo y Resinosa).

**Pieter Van  
Musschenbroek**



**1734 - 1748**

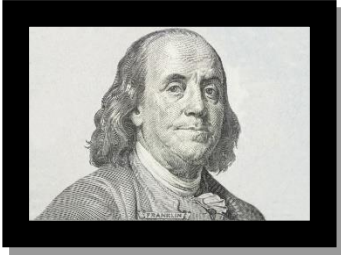
La electricidad o efecto ámbar es una virtud eléctrica.

El Efluvios o electricidad viaja por los cables metálicos.

Inventó la Jarra de Leyden.

Mencionó por primera vez que la electricidad puede ser un compuesto eléctrico o una materia eléctrica que puede ser transferida y transportada.

## **Benjamín Franklin**



**1747 - 1756**

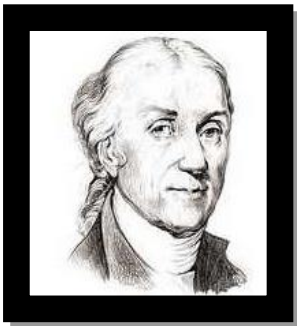
El fuego eléctrico se comporta como un fluido que fluye.

Le electricidad es carga eléctrica que se puede almacenar en la Jarra de Leyden, y esta se clasifica en electricidad con carga positiva y electricidad con carga negativa.

Demostró la equivalencia entre la electricidad por frotamiento y los rayos.

Genero el cambio conceptual de comunicación eléctrica a conducción eléctrica, además denominó los materiales como en conductores y aislantes.

## **Henry Cavendish**



**1781**

Mencionó la existencia de la resistencia eléctrica.

Es una fuerza que resiste la corriente eléctrica, por lo que, en un montaje con la Jarra de Leyden, fluiría más electricidad por los circuitos que tenga menos resistencia y fluiría menos electricidad por el que haya más.

## **Charles Augustin de Coulomb**



**1785 - 1786**

La electricidad se comporta como un fluido eléctrico.

Demostró la ley de la fuerza eléctrica.

Las densidades de flujos eléctricos se atraen o se repelen según la ley de la fuerza eléctrica.

La electricidad es una cualidad eléctrica que se manifiesta en los cuerpos cargados.

No existe un material Idioeléctrico (aislante) perfecto.

Postuló la existencia de partículas conductoras en medio de todos los materiales y estas permiten que el fluido eléctrico fluya por estos.

Los materiales idioeléctricos se clasifican dependiendo su porcentaje de partículas conductoras que posean.

Existe una resistencia del cuerpo al transmitir o dejar pasar la cualidad eléctrica, es decir se opone a la salida del fluido.

La corriente eléctrica es cuando la electricidad fluye por el material por las partículas conductoras que posee.

Los conductores metálicos son conductores perfectos ya que permiten el flujo de corriente eléctrica instantáneamente.

## **Luigi Galvani**



**1791**

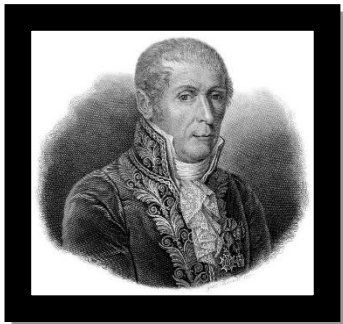
Electricidad animal o fuerza vital (corriente galvánica).

La electricidad animal fluye de los músculos a los nervios.

Clasificó la electricidad entre la electricidad natural y la electricidad artificial.

Caracterizó los materiales que producen el efecto de los movimientos musculares entre conductores y menos conductores.

## **Alessandro Volta**



**1792**

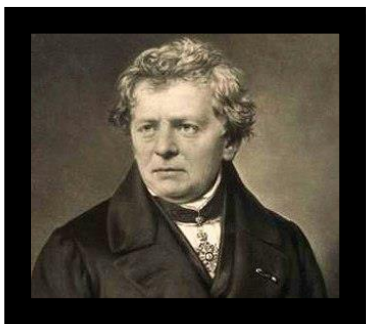
Demostró que en los músculos no hay electricidad almacenada.

Postuló la electricidad por contacto.

Cuando se crea esta electricidad se excita el fluido eléctrico, donde el fluido eléctrico es como materia eléctrica que se genera en ciertas condiciones.

La invención de Volta para generar electricidad: la columna de Volta.

**Dr. Georg Simón  
Ohm**



**1827**

Definió los conceptos de Voltaje y Tensión eléctrica.

Demostó la ecuación de la fuerza eléctrica en la cadena galvánica y la ecuación de la intensidad de corriente eléctrica en un flujo cerrado (ley de Ohm).

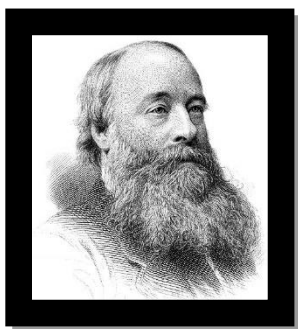
En los extremos de la cadena Galvánica existe una fuerza electroscópica.

La electricidad se clasifica entre la electricidad libre y la electricidad ligadas a los cuerpos,

donde La electricidad libre o corriente eléctrica fluye por los materiales gracias a las partículas conductoras.

Los materiales poseen un coeficiente de conducción que determina su capacidad de conducción de la corriente eléctrica, y encontró el coeficiente de conducción en algunos materiales.

**James Prescott  
Joule**

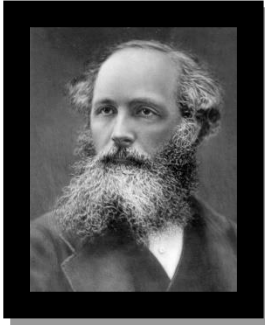


**1840**

Encontró la relación del calor desprendido en un periodo de tiempo por un conductor metálico, dependiendo de la resistencia del cuerpo y la intensidad de corriente en un circuito de electricidad voltaica.

La corriente eléctrica es una forma de energía, que responde al principio de conservación de la energía, donde al paso de la electricidad voltaica por un conductor metálico este desprende calor.

## **James Clerk Maxwell**



**1873**

Realizo un análisis y recorrido por los diferentes modelos, leyes y teorías para describir los fenómenos de la corriente eléctrica propuestos hasta su época, mostrando los aspectos donde estas teorías funcionan y donde fallan.

Análisis sobre las concepciones de corriente eléctrica como Fluido:

-Un fluido: que fluye por los materiales o como el éter electromagnético.

-Dos fluidos: llamados como Vitreo y Resinoso, luego como electricidad con carga positiva y electricidad con carga negativa y por último dos fluidos eléctricos con movimiento opuesto dando existencia a la electricidad libre y la electricidad combinada.

Análisis sobre la corriente eléctrica como fluido, pero dependiendo de las partículas conductoras:

-Las partículas como medio para que pueda fluir el fluido eléctrico.

Análisis sobre la corriente eléctrica como movimiento de partículas conductoras:

-Creación de partículas conductoras y por tanto la creación de materia eléctrica.

Dos tipos de partículas conductoras positivas y negativas, llamadas moléculas.

Análisis de la corriente eléctrica como forma de energía análoga al calor.

Análisis de la corriente eléctrica en el fenómeno de la electrolisis con movimiento de iones (moléculas o partículas con carga y masa) desde el componente electronegativo Ion hasta el componente electropositivo Cation.

**Joseph John  
Thomson**



**1879**

Descubrió el electrón.

Los rayos catódicos están conformados por corpúsculos, también llamados como átomos primordiales, átomos elementales, subátomos, iones univalentes, átomos de electricidad o electrones.

Los corpúsculos o átomos de electricidad poseen carga y masa

Los átomos de electricidad producen el fenómeno de la corriente eléctrica al moverse

de molécula a molécula de materia como en la conducción metálica ordinaria.

La corriente eléctrica como movimiento de electrones con carga negativa.

**Paul Drude**



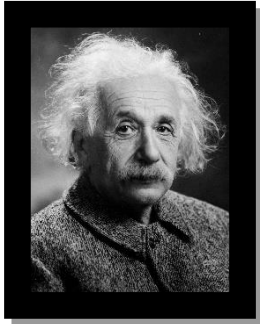
**1900**

La corriente eléctrica se produce mediante el transporte de pequeñas partículas eléctricas llamadas electrones.

Los electrones libres en un metal se modelan como un gas de electrones, e interactúan con los iones mediante colisiones elásticas.

La conductividad eléctrica y térmica está en relación significativa con la cantidad de electrones libres.

## **Albert Einstein**



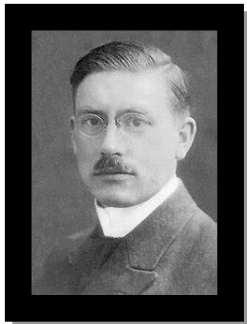
**1906**

Los átomos individuales realizan oscilaciones senoidales alrededor de la posición de equilibrio y la frecuencia de oscilación depende de la energía, es decir de la temperatura del material.

Los átomos están unidos a la red sólida y la vibración está restringida en múltiplos entero de  $h\nu$ .

Todos los sólidos que conducen electricidad contienen masas (electrones) que se mueven libremente.

## **Petrus J. W. Debye**



**1920**

Los átomos que constituyen los sólidos vibran acoplados en sistemas de N-osciladores en torno a su posición de equilibrio.

Las ondas se propagan por el cristal, la energía de los osciladores esta cuantizada y el cuanto de energía es  $h\omega$ .

**Arnold  
Sommerfeld**



**1927**

Modelo de gas de electrones libres.

Existen electrones libres que están débilmente ligados al átomo y electrones fuertemente ligados al átomo.

Los electrones libres son fundamentales para la capacidad de conducción en los metales.

El núcleo con los electrones fuertemente ligados se modela como una esfera dura con carga positiva, llamada ion.

El movimiento de los electrones libres en el interior del metal es aleatorio.

Introduce el principio de exclusión de Pauli al modelo de gas de electrones, lo que genera una interacción repulsiva entre los electrones libres y los iones.

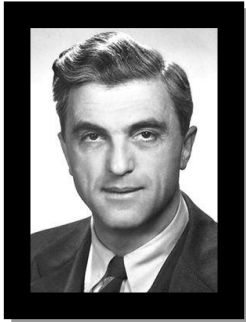
La interacción entre electrones libres y iones es un intercambio de energía.

Introduce el concepto de tiempo medio entre colisiones ( $\tau$ ).

La capacidad de conducción en los metales disminuye a medida que aumenta las colisiones entre electrones y iones, y esto se debe a que las vibraciones de la red aumentan con la temperatura.

Dedujo la relación inversamente proporcional de la conductividad eléctrica con la temperatura, pero no se demuestra.

## Félix Bloch



1929

Agrega la estadística de Fermi al modelo de electrones libres, ya que le permite trabajar con n-electrones en varios estados en sistemas de fermiones.

Al aplicar un campo eléctrico homogéneo los electrones libres son acelerados y viajan a través de la red, estos solo se desvían como resultado del movimiento térmico de los átomos, así de este modo se da lugar a un camino libre medio y a una conductividad.

La interacción entre electrones libres y átomos de la red es un aspecto muy importante en los fenómenos de corriente eléctrica, ya no se considera una colisión clásica, sino que ahora es un intercambio cuántico de energía con la red. Se da por medio de una cuasipartícula virtual de energía y cantidad de movimiento llamada Fonón, la cual está relacionada a las vibraciones de la red y en función de la temperatura.

Expresión del cambio de energía de un electrón cuando absorbe o emite un Fonón:  $E_{klm} - E_{k'l'm'} = \pm h\nu$

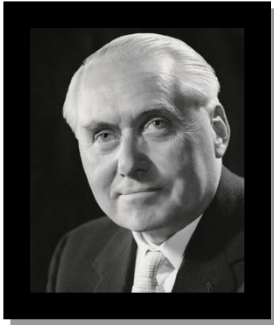
Obtiene la ecuación de la conductividad y su relación con la temperatura.

$$\sigma = \frac{4(6\pi^2 x)^2}{3\pi^5} \cdot \frac{e^2 d \tau \omega v a^2 \mu^2}{m C^2 h} \left( \frac{h\nu}{ak\theta} \right)^5 \cdot \frac{\theta}{T}$$

Extiende el entendimiento a materiales aislantes.

Una dificultad presente es sus resultados es que no funciona bien a temperaturas bajas, por lo que la teoría debe estar incompleta, esto se evidencia en lo teórico con lo experimental, ya que existe el fenómeno de la superconductividad.

**Alan Herries  
Wilson**



**1936**

La diferencia entre tipos de sólido está con relación a como se distribuyen los electrones en bandas de energía (niveles de energía). Además, existe una brecha de energía (banda prohibida) para producir electrones libres en los distintos sólidos: semiconductores y aislantes.

Un semiconductor es un sólido que se comporta como aislante a baja temperatura, ya que presenta gran resistencia, pero disminuye al aumentarla, en dado caso se comporta como conductor.

En los metales una mínima energía genera que pasen los electrones de la banda de valencia a la banda de conducción.

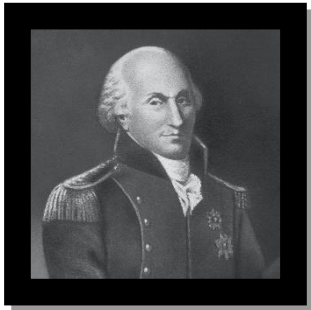
En los Semiconductores existe una brecha de energía (BandGap) que no es muy grande, y si se les proporciona una cantidad determinada de energía los electrones pasan de la banda de valencia a la banda de conducción y por tanto pueden conducir la corriente eléctrica.

En los aislantes la energía necesaria para pasar los electrones de la banda de valencia a la banda de conducción, supera la resistencia del material.

En esta teoría se generalizó la conducción eléctrica para otros tipos de material.

## LA SUPERCONDUCTIVIDAD

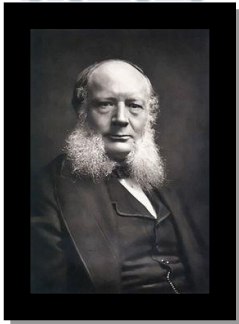
### Charles Augustin de Coulomb



**1785 - 1786**

El conductor perfecto es aquel que tiene la capacidad de permitir el flujo de corriente eléctrica instantáneamente.

### Carl Wilhelm Siemens

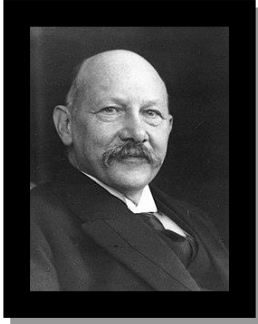


**1870**

Experimentos de la resistencia eléctrica en busca de mejorar el telegrafío.

Resistencia mínima lograda con el mercurio  $0.96146 \Omega$ . Teniendo como referencia la resistencia eléctrica a  $0^\circ$  era  $13.071 \Omega$ .

**Heike Kamerlingh  
Onnes**

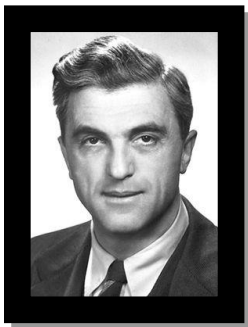


**1911**

Descubre que a cierta temperatura algunos metales presentan cero resistencia al paso de la corriente eléctrica, lo cual se denominó como el estado superconductor, para el mercurio sucede a 4.2 K.

La superconductividad es una transición de fase que se produce al cumplir con ciertas condiciones de temperatura crítica  $T_c$  y campo magnético crítico  $H_c$ .

**Félix Bloch**

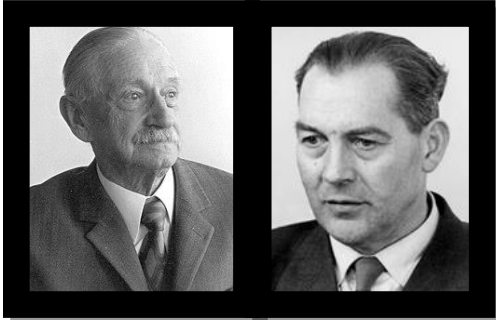


**1932**

La teoría de Bloch para conductividad eléctrica solo función para metales normales.

Hace falta algo nuevo para explicar la superconductividad, ya que no puede ser resuelta con un enfoque que utiliza electrones individuales.

**Walter Meissner y  
Robert Ochsenfeld**

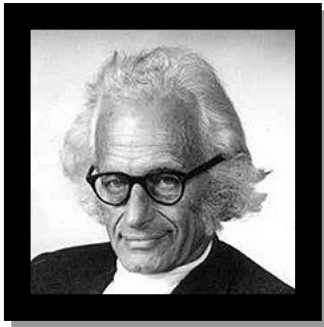


**1933**

Descubren que un superconductor es un diamagnético perfecto, ya que expulsa todo el flujo magnético.

Llamando este comportamiento como: el efecto Meissner.

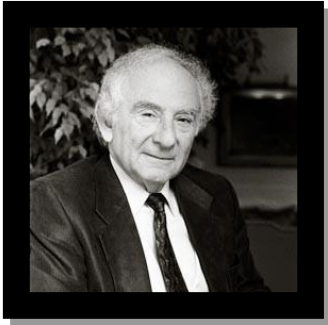
**Herbert Fröhlich**



**1950**

Para comprender la superconductividad, el efecto físico clave debe ser un cambio inducido por fonones en la energía propia de reacción de electrones cercanos.

## León Neil Cooper



**1955 - 1956**

Comienza a trabajar en base al trabajo de Bloch, pero con el objetivo de involucrar no solo metales normales sino también metales superconductores.

La superconductividad debe producirse por una interacción entre electrones.

Encuentra un extraño estado ligado de pares de electrones que se da por debajo de una brecha de energía, los cuales poseen en conjunto espín igual a cero, se comportan con atracción atractiva y su energía es  $(\hbar\omega)^2$ .

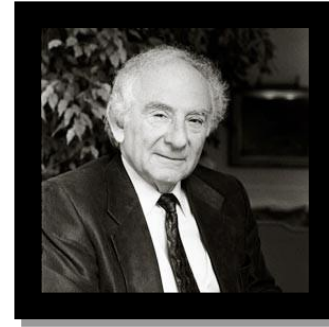
**John Bardeen**



**John Robert  
Schrieffer**



**León Neil  
Cooper**



## **Teoría BSC 1957**

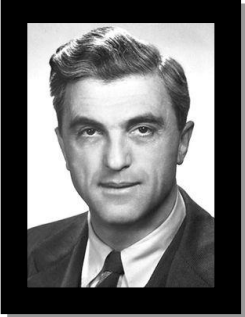
La superconducción se da mediante pares de electrones enlazados con nuevas características y comportamientos.

Dos electrones enlazados mediante intercambio de Fonones se denominan par de Cooper, los electrones en el par poseen espines opuestos.

El par de electrones sufre una atracción atractiva entre ellos y se comportan como un Bosón.

La interacción electrón-red-electrón sucede cuando un electrón emite un fonón y el otro lo absorbe, la red hace el papel de intermediario.

Existe una brecha de energía relacionada con la energía de Fermi, la cual consiste en una Banda prohibida en el estado superconductor, esta se refiere a que si los electrones están por encima de esta banda se comportan como electrones individuales, por otro lado, aquellos que estén por debajo forman pares, lo cual genera la conducción perfecta muy distinta a la idea original de Coulomb.

<p><b>Félix Bloch</b></p>  <p><b>1958</b></p>	<p>El apareamiento de electrones era la idea correcta que se necesitaba para resolver la superconductividad</p>
--	---

Referencia de imágenes en el anexo:

- Tales de Mileto tomado de: [https://es.wikipedia.org/wiki/Tales\\_de\\_Mileto](https://es.wikipedia.org/wiki/Tales_de_Mileto)
- William Gilbert tomado de: <https://naukas.com/2014/05/27/william-gilbert-un-hombre-con-magnetismo/>
- Otto Von Guericke tomado de: <https://www.alamy.com/stock-photo-guericke-otto-von-20111602-1151686-german-scientist-physicist-portrait-23618264.html>
- Stephen Gray tomado de: <https://estudiosdelafisica.wordpress.com/2015/04/02/stephen-gray/>
- François de Cisternay du Fay tomado de: [https://es.wikipedia.org/wiki/Charles\\_Fran%C3%A7ois\\_de\\_Cisternay\\_du\\_Fay](https://es.wikipedia.org/wiki/Charles_Fran%C3%A7ois_de_Cisternay_du_Fay)
- Pieter Van Musschenbroek tomado de: <https://www.epec.com.ar/docs/educativo/institucional/fichaleiden.pdf>
- Benjamín Franklin tomado de: <https://jesusgarciaj.com/2018/10/07/las-13-virtudes-de-benjamin-franklin/>
- Henry Cavendish tomado de: <https://clickmica.fundaciondescubre.es/conoce/nombres-propios/henry-cavendish/>
- Charles Augustin de Coulomb tomado de: <https://www.biography.com/scientist/charles-de-coulomb>
- Luigi Galvani tomado de: [https://es.wikipedia.org/wiki/Luigi\\_Galvani](https://es.wikipedia.org/wiki/Luigi_Galvani)

- Alessandro Volta tomado de: <https://clickmica.fundaciondescubre.es/conoce/nombres-proprios/alessandro-volta/>
- Georg Simon Ohm tomado de: <https://afinidadelctrica.com/2020/05/27/georg-simon-ohm-%CF%89/>
- James Prescott Joule tomado de: <https://www.biografiasyvidas.com/biografia/j/joule.htm>
- James Clerk Maxwell tomado de: [https://estudiosdelafisica.wordpress.com/2015/04/01/james-cleck-maxwell/james\\_maxwell/](https://estudiosdelafisica.wordpress.com/2015/04/01/james-cleck-maxwell/james_maxwell/)
- Joshep John Thomson tomado de: [https://es.wikipedia.org/wiki/Joseph\\_John\\_Thomson](https://es.wikipedia.org/wiki/Joseph_John_Thomson)
- Paul Drude tomado de: [https://es.wikipedia.org/wiki/Paul\\_Drude](https://es.wikipedia.org/wiki/Paul_Drude)
- Albert Einstein tomado de: [https://es.wikipedia.org/wiki/Albert\\_Einstein](https://es.wikipedia.org/wiki/Albert_Einstein)
- Petrus J. W. Debye tomado de: [https://es.wikipedia.org/wiki/Peter\\_Debye](https://es.wikipedia.org/wiki/Peter_Debye)
- Arnold Sommerfeld tomado de: <https://blogs.ua.es/fisicateleco/2017/07/25/sommerfeld/>
- Félix Bloch tomado de: [https://es.wikipedia.org/wiki/Felix\\_Bloch](https://es.wikipedia.org/wiki/Felix_Bloch)
- Alan Herries Wilson tomado de: [https://en.wikipedia.org/wiki/Alan\\_Herries\\_Wilson](https://en.wikipedia.org/wiki/Alan_Herries_Wilson)
- Carl Wilhelm Siemens tomado de: [https://es.wikipedia.org/wiki/Carl\\_Wilhelm\\_Siemens](https://es.wikipedia.org/wiki/Carl_Wilhelm_Siemens)
- Heike Kamerlingh Onnes tomado de: [https://en.wikipedia.org/wiki/Heike\\_Kamerlingh\\_Onnes](https://en.wikipedia.org/wiki/Heike_Kamerlingh_Onnes)
- Walter Meissner tomado de: [https://es.wikipedia.org/wiki/Walter\\_Meissner](https://es.wikipedia.org/wiki/Walter_Meissner)
- Robert Oshsenfeld tomado de: <https://efectomeissner.wordpress.com/2011/12/19/walter-meissner-y-robert-ochsenfeld/>
- Herbert Fröhlich tomado de: [https://en.wikipedia.org/wiki/Herbert\\_Fr%C3%B6hlich](https://en.wikipedia.org/wiki/Herbert_Fr%C3%B6hlich)
- León Neil Cooper tomado de: <https://mediatheque.lindau-nobel.org/laureates/cooper>
- John Barden tomado de: [https://es.wikipedia.org/wiki/John\\_Bardeen](https://es.wikipedia.org/wiki/John_Bardeen)
- Robert Schrieffer tomado de: [https://es.wikipedia.org/wiki/John\\_Robert\\_Schrieffer](https://es.wikipedia.org/wiki/John_Robert_Schrieffer)