

**FORMACIÓN DE IMÁGENES EN EL SEM UN ANÁLISIS DEL  
COMPORTAMIENTO DEL ELECTRÓN**

Julián Camilo Andrade Narváez

Erikson Rodríguez Ortiz

Maestría en Docencia de las Ciencias Naturales, Facultad de Ciencia y Tecnología

Universidad Pedagógica Nacional

Bogotá D.C

2024

**Formación de imágenes en el SEM  
un análisis del comportamiento del electrón**

**Julián Camilo Andrade Narváez**

**Erikson Rodríguez Ortiz**

**Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de Magister en Docencia  
de las Ciencias Naturales**

**Asesores:**

**José Francisco Malagón Sánchez.**

**Sandra Sandoval Osorio.**

**Grupo de Investigación: Estudios Histórico Críticos y Enseñanza de las Ciencias EHC<sup>^</sup>EC**

**Línea de investigación: Enseñanza de las ciencias desde una perspectiva fenomenológica**

**Maestría en Docencia de las Ciencias Naturales, Facultad de Ciencia y Tecnología**

**Universidad Pedagógica Nacional**

**Bogotá D.C**

**2024**

Para todos los efectos, declaramos que el presente trabajo es original y de nuestra total autoría: en aquellos casos en los cuales hemos requerido del trabajo de otros autores o investigadores, hemos dado los respectivos créditos.

A mi madre, que desde el cielo me sigue inspirando

**Camilo Andrade**

A mis futuras generaciones

**Erikson Rodríguez**

## **Agradecimientos**

*A Dios por guiarnos y permitirnos cumplir nuestros proyectos y sueños.*

*A nuestras familias por apoyarnos y aconsejarnos en cada decisión que enfrentamos a lo largo de la maestría.*

*A la facultad de ingeniería de la Pontificia Universidad Javeriana especialmente a Daniel Otalora, Yezid Alvarado y Elizabeth Gil por sus valiosas explicaciones del uso y funcionamiento del SEM.*

*A nuestros profesores de posgrado, quienes nos hicieron replantear nuestras ideas sobre la ciencia y nuestra práctica pedagógica.*

*A nuestros asesores, Francisco Malagón y Sandra Sandoval, cuya paciencia y valiosos consejos guiaron el camino que dio fruto a esta investigación.*

## Tabla de contenido

<b>CAPÍTULO 1. CONTEXTO, DESAFÍOS Y OBJETIVOS DEL ESTUDIO.....</b>	<b>10</b>
1.1 INTRODUCCIÓN .....	10
1.2 CUESTIONAMIENTOS INICIALES.....	14
1.3 PREGUNTA PROBLEMA .....	16
1.4 OBJETIVOS .....	17
1.4.1. <i>Objetivo General</i> .....	17
1.4.2. <i>Objetivos Específicos</i> .....	17
1.5 ASPECTOS GENERALES .....	17
<b>CAPÍTULO 2. PROBLEMATIZACIÓN EN LA FORMACIÓN DE IMÁGENES EN UN MO Y EN UN SEM.....</b>	<b>20</b>
2.1. CARACTERIZACIÓN DEL MO.....	20
2.2. CARACTERIZACIÓN DEL SEM.....	30
2.2.1. <i>Fuente de Emisión de Electrones</i> .....	32
2.2.2. <i>Emisión de electrones en la fuente</i> .....	34
2.2.3. <i>Lentes electromagnéticas</i> .....	37
2.2.4. <i>Formación de la imagen</i> .....	40
<b>CAPÍTULO 3. EL COMPORTAMIENTO DUAL DE FOTONES Y ELECTRONES EN LA MICROSCOPIA ÓPTICA Y ELECTRÓNICA .....</b>	<b>44</b>
3.1 DEFLEXIÓN Y CONTROL DEL HAZ.....	45
3.2 INTERACCIÓN CON LA MATERIA .....	49
<b>CAPÍTULO 4. DE LA HISTORIA A LA PRÁCTICA .....</b>	<b>53</b>
4.1 LA HISTORIA Y LA FILOSOFÍA DE LAS CIENCIAS EN LA EDUCACIÓN.....	53

4.2 EL PAPEL DE LOS INSTRUMENTOS EN CIENCIAS Y EN LA EDUCACIÓN EN CIENCIAS .....	56
4.3 ANÁLISIS DEL SEM COMO INSTRUMENTO CIENTÍFICO .....	64
4.4 RELACIONES EXPERIMENTALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL CONOCIMIENTO .....	67
4.5 ENSEÑANZA DEL COMPORTAMIENTO DUAL DE ELECTRONES EN IMÁGENES SEM .....	70
4.5.1. Metodología .....	71
4.5.2. Diseño de la propuesta .....	73
4.5.3. Propuesta de Aula.....	78
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>99</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>102</b>

## Lista de Figuras

<b>Figura 1.</b> Incidencia de la luz sobre la muestra.....	25
<b>Figura 2.</b> Ángulo formado por el haz.....	26
<b>Figura 3.</b> Mejora en la resolución de una imagen .....	27
<b>Figura 4.</b> Polvo de Alas de Mariposa.....	29
<b>Figura 5.</b> Esquema de un típico cañón de electrones de emisión termoiónica de tungsteno .....	36
<b>Figura 6.</b> Diagrama de lente electromagnética en un SEM.....	39
<b>Figura 7.</b> Imagen topográfica y de composición de una lámina metálica.....	43
<b>Figura 8.</b> Tubo de rayos catódicos .....	47
<b>Figura 9.</b> Pico de dispersión elástica de algunos electrones .....	49
<b>Figura 10.</b> Picos de interferencia de una lámina de Níquel .....	51
<b>Figura 11.</b> Ejes investigativos.....	71
<b>Figura 12.</b> Triangulación en torno al instrumento científico (SEM).....	75
<b>Figura 13.</b> <i>Lupa con patrón de aumento</i> .....	79
<b>Figura 14.</b> Diagrama MO y SEM para trayectorias corpusculares de fotones y electrones.....	86
<b>Figura 15.</b> Diagrama MO y SEM para trayectorias ondulatorias de fotones y electrones .....	87
<b>Figura 16.</b> Patrón de difracción de fotones y electrones .....	92

## Lista de abreviaturas

**AN:** Apertura Numérica

**BSE:** Backscattered Electrons - Electrones Retrodispersados

**$i_e$ :** Corriente de emisión

**$i_b$ :** Corriente del haz

**MO:** Microscopio Óptico

**SE:** Secondary Electrons - Electrones Secundarios

**SEM:** Scanning Electron Microscope – Microscopio Electrónico de Barrido

**TEM:** Transmission Electron Microscopy – Microscopio Electrónico de Transmisión

## Lista de Tablas

**Tabla 1.** Organización por sesiones de las actividades ..... 76

## **Resumen**

Diversas investigaciones realizadas entre los siglos XIX y XX en el campo de la Física teórica y experimental, orientadas a comprender el comportamiento de los rayos catódicos, constituyeron el fundamento para el desarrollo de la microscopía electrónica, una técnica que ha permitido analizar la estructura de la materia a nivel nanométrico.

De esta manera, este estudio analiza el valor del SEM (Scanning Electron Microscope) en la enseñanza del comportamiento dual de los electrones dentro del marco de la física moderna, a través de una reconstrucción histórica donde se analizan los desarrollos teóricos y técnicos de los microscopios ópticos (MO) y electrónico, comparando diferentes eventos en torno a la formación de imágenes y estableciendo puntos de comparación en relación con el comportamiento ondulatorio de fotones y electrones, con énfasis en este último. Como resultado de este análisis, se usa el SEM para construir una propuesta educativa dirigida a estudiantes de pregrado en ciencias, identificando la importancia de los eventos históricos que incluyen una serie de acontecimientos científicos que promueven la discusión y cuyos experimentos pueden extrapolarse para comprender el funcionamiento teórico del instrumento y con ello fortalecer los procesos de enseñanza de las ciencias, aplicando este desarrollo en torno a las teorías que explican la formación de imágenes en el SEM.

*Palabras clave:* difracción, electrones, fotones, instrumento científico, longitud de onda, microscopía, refracción, SEM.

## **Abstract**

Various investigations carried out between the 19th and 20th centuries in the fields of theoretical and experimental physics, aimed at understanding the behavior of cathode rays, laid the foundation for the development of electron microscopy—a technique that has enabled the analysis of matter's structure at the nanometric level.

Thus, this study analyzes the value of the SEM (Scanning Electron Microscope) in teaching the dual behavior of electrons within the framework of modern physics, through a historical reconstruction that examines the theoretical and technical developments of optical (OM) and electron microscopes. It compares different events related to image formation and establishes points of comparison regarding the wave-particle behavior of photons and electrons, with an emphasis on the latter. As a result of this analysis, the SEM is used to build an educational proposal aimed at undergraduate science students, identifying the importance of historical events that include a series of scientific occurrences which promote discussion. These experiments can be extrapolated to understand the theoretical functioning of the instrument, thereby strengthening the processes of science teaching by applying this development to the theories explaining image formation in the SEM.

*Keywords:* diffraction, electrons, microscopy, photons, refraction, scientific instrument, SEM, wavelength.

## Capítulo 1. Contexto, Desafíos y Objetivos del Estudio

### 1.1 Introducción

El *Discurso del Método* publicado por Descartes en el año de 1637, nos invita a creer que nada está completamente en nuestro poder excepto nuestros pensamientos, motivándonos así a cuestionar la naturaleza misma. Con este espíritu de exploración, este trabajo se compromete con el conocimiento de uno de los instrumentos de mayor uso en diferentes campos de las ciencias e ingeniería, el SEM.

Hoy en día, el uso de equipos sofisticados, como el SEM, es cada vez más valioso en las ciencias e ingeniería para el análisis de muestras. El SEM captura imágenes detalladas y es fundamental en aplicaciones como el análisis inmunocitoquímico de los componentes superficiales, el estudio de la morfología y la topografía de muestras biológicas o químicas, y la identificación de la composición elemental mediante el análisis de los rayos X emitidos tras la irradiación con un haz de electrones.

Las imágenes producidas en el SEM se configuran a partir de las intensidades de las emisiones de los electrones de la muestra generadas por el impacto del haz primario, transformando esta información en datos para su posterior interpretación en un monitor. En contraste, las imágenes en un MO dependen de la información obtenida de la interacción fotón-materia e interpretándose de manera directa por el observador. No obstante, en ambos casos su análisis está sujeto en gran medida a la experiencia y conocimientos del microscopista.

En algunos textos de microscopía, el funcionamiento del SEM se reduce a un uso meramente técnico. Esta perspectiva simplifica la comprensión de la formación de imágenes, ignorando aspectos importantes como la interacción electrón-materia y la naturaleza dual del

electrón. En su lugar, se centra principalmente en cómo mejorar el análisis de la muestra a través de componentes del equipo, como las lentes, el sistema de vacío y la fuente de emisión de energía. Al hacerlo, se omiten en parte las teorías en las que se fundamenta la microscopía electrónica debido a su orientación con fines técnicos y comerciales.

Esta visión de la microscopía no solo simplifica la complejidad del fenómeno científico, sino que también puede llevar a asumir que hay una única manera de interpretar los datos, ignorando aspectos subyacentes al mismo funcionamiento del equipo; por el contrario, al asociar el razonamiento con la experiencia, se abre la posibilidad de explorar diferentes enfoques para comprender los fenómenos, permitiendo no solo cuestionar los hechos observados, sino también someterlos a un análisis crítico que valide su veracidad (Blanche, 1972).

Este análisis se pone en escena al emplear un instrumento científico como el SEM, el cual suele asociarse exclusivamente con el formalismo técnico debido a su enfoque práctico, de modo que esta investigación relaciona aspectos de orden teórico que resaltan el papel de la ciencia detrás del equipo buscando una comprensión del mundo, asociada a una modificación en la percepción y uso de objetos científicos.

Para respaldar estas ideas, se comienza con un análisis de las contribuciones en torno a los microscopios óptico y electrónico, centrándose en el SEM, donde se destacan los aportes de Sánchez y Oliva (2015), sobre la historia de la magnificación de objetos, la evolución del microscopio óptico y cómo sus aplicaciones mejoraron la técnica. La experiencia de microscopistas destacados como Anton van Leeuwenhoek en el S. XVII, Robert Hooke en 1663 y Galileo Galilei en 1673, ayudaron a perfeccionar la técnica microscópica.

---

En 1674, Leeuwenhoek no contaba con un equipo que concentrara la luz en el objeto a observar; sus observaciones rudimentarias se basaban en la luz del día o en una vela. Una de las mejoras de la microscopía consistió en la introducción de una fuente de luz (Bradbury, 1968), cuyo análisis emplea la descripción geométrica del comportamiento de esta al pasar a través de distintas lentes con una configuración característica, buscando con ello la observación de más detalles en la muestra, reflexiones que permiten comprender el complejo mecanismo de la interacción fotón-materia para formar una imagen; con estas investigaciones se presenta la necesidad de ir más a fondo en los procesos involucrados en esta interacción sobre el límite de resolución de la imagen, la apertura numérica de la lente y las limitaciones de la proyección de la imagen producto de la longitud de onda de la luz, propuestas por Megías, Molist y Pombal (2024). Estos fundamentos teóricos permiten comprender que el perfeccionamiento de la técnica se ve limitado por la teoría, estableciendo la necesidad de superar los problemas de resolución mencionados por Abbe, cumpliendo este objetivo el desarrollo de la microscopía electrónica.

Debido a este límite, que tenía una característica teórica en relación con la longitud de onda de la luz, era imposible pensar que se lograra una magnificación mayor, siendo necesario pensar en una fuente diferente capaz de formar imágenes: los electrones. Dentro de este contexto, destacan los aportes de Falconer (1987), cuya reconstrucción histórica menciona el papel de Thomson de principios del siglo XIX e inicios del siglo XX, que tomando principalmente las investigaciones de Plücker de 1858 y Crookes de 1879, constituyen un insumo para desarrollar una comprensión más profunda de los rayos catódicos, además de las elaboraciones experimentales empleadas durante las investigaciones por Clinton Davisson de inicios del siglo XX quien sustenta experimentalmente el comportamiento ondulatorio de los electrones, expuestas teóricamente por la idea de Broglie sobre asociar una longitud de onda a la materia, permitiendo establecer la

---

posibilidad de generar imágenes con electrones por su característica ondulatoria. Ahora bien, todas estas ideas son empleadas por Ernst Ruska y Max Knoll para construir un microscopio electrónico donde se destacan los aportes de Alfonso (2009), quien describe los fundamentos de la microscopía electrónica como un proyecto tecnológico que incorporó avances significativos de tipo técnico y teórico; desarrollos considerados para la construcción del SEM.

Teniendo en cuenta las ideas más significativas para la formación de imágenes, se considera la necesidad de analizar el valor de estos principios físicos en la formación docente y en la enseñanza de las ciencias en educación superior, a partir de esto, el análisis del impacto de los experimentos y sus herramientas para fortalecer el desarrollo de habilidades científicas y potenciar la cultura tecnocientífica termina siendo enriquecedor, para ello, se retoman las ideas de Baird (2004), quien menciona la importancia de comunicar saberes a partir del conocimiento encapsulado detrás de los instrumentos. Además, se considera la perspectiva de Fleming (1974), que asigna un rol diferente a la utilidad de un artefacto, enfocándose en el comportamiento humano asociado con este y las estructuras sociales involucradas, así el uso del SEM no solo sirve como sustento de teorías existentes, sino que este actúa como base para el desarrollo de las teorías en física de los siglos XIX y XX, a partir de la utilidad y del conocimiento teórico y experimental que hay detrás de este instrumento.

A la luz de lo expuesto, la propuesta pedagógica del uso de la historia como recurso que aporta a los procesos de enseñanza-aprendizaje, especialmente en la formación de profesores de ciencias, se fundamenta en los estudios de Höttecke, Henke y Riess (2010) así como de Malagón, Ayala y Sandoval (2011). Estos autores destacan cómo los procesos históricos y experimentales en el aula enriquecen la comprensión de los fenómenos y facilitan la integración de una multiplicidad de conceptos científicos en lugar de promover una única verdad. Esta propuesta

incorpora la interpretación de fragmentos científico-históricos y la realización de experimentos para fomentar la discusión sobre la formación de imágenes en un SEM en relación con la longitud de onda de los electrones, la idea de magnificación y resolución de una imagen, con el objetivo de presentar el uso de un instrumento científico como un elemento que permitiría el desarrollo de habilidades científicas.

## **1.2 Cuestionamientos Iniciales**

En un principio, la exploración teórica de los componentes y el funcionamiento del SEM permitió reconocer que su comparación con un microscopio óptico es, en esencia, la misma: una fuente que ilumina una muestra con la ayuda de unas lentes condensadoras y un sistema de magnificación que produce una imagen aumentada por las lentes objetivas. Sin embargo, las principales diferencias encontradas son: la fuente de iluminación (fotones-electrones), las lentes (vidrio-electromagnéticas) y la forma de observar la imagen final (observación directa-monitor) (Alfonso, 2009). Al identificar que la principal diferencia radica en la naturaleza de la fuente de iluminación, esto se toma como base para analizar las implicaciones que dicha diferencia genera en la formación de imágenes, considerando el tamaño y la longitud de onda de los fotones y los electrones. Por consiguiente, la comprensión del comportamiento de los electrones no es un aspecto irrelevante, sino que por el contrario requiere un análisis exhaustivo de sus características y propiedades.

Una vez identificado el primer aspecto a analizar, se continúa con una descripción conceptual de las características del SEM, con el objetivo de mostrar un conocimiento completo del tema. Sin embargo, esta comprensión se vio limitada al no conocer el trasfondo de cada componente. Por ejemplo, cuando se mencionó el uso del haz de electrones, solo se consideró una

---

visión corpuscular, explicándose inicialmente la formación de imágenes únicamente a partir de los fenómenos de reflexión, ignorando las ideas del frente de onda de los electrones, desligando el fenómeno de difracción, el de la dualidad onda-partícula y, por lo tanto, su impacto en la magnificación y resolución de las imágenes obtenidas con el SEM. Por tanto, este primer acercamiento da lugar a la formulación de una primera pregunta problema: desde el punto de vista de la mecánica cuántica, ¿Qué procesos fundamentales ocurren cuando los electrones interactúan con los átomos de la muestra en el SEM?

En retrospectiva, la necesidad de incluir la dualidad de los electrones, añade un elemento adicional de complejidad a esta visión. Según De Broglie (1939), para describir tanto las propiedades de la materia como las de la luz, hay que hablar a la vez de ondas y de corpúsculos. El electrón no puede concebirse ya como un simple gránulo de electricidad; hay que asociarlo a una onda, y esta onda no es un mito; se puede medir su longitud de onda. Sin embargo, además del planteamiento matemático de De Broglie es necesario la comprensión de elementos de orden teórico, técnico y epistemológico para lograr dar cuenta de la complejidad del fenómeno detrás de la formación de imágenes con electrones.

De allí que esta investigación examina la evolución cronológica de la microscopía para explorar los inicios de esta técnica junto a sus explicaciones subyacentes con el fin de comprender no solo el comportamiento del electrón, sino también su influencia en la técnica en cuestión. Considerando este escenario, surge un segundo cuestionamiento que guio el desarrollo de esta investigación: ¿Cómo afecta el comportamiento dual onda-partícula de los electrones a la formación y procesamiento de imágenes en un SEM? Y, en consecuencia, ¿cómo podría esta

---

interpretación de la dualidad onda-partícula ayudar a un docente de Ciencias Naturales a reconstruir y mejorar sus explicaciones sobre la teoría cuántica?

Con este desarrollo histórico, se comprende que, desde los primeros diseños de la microscopía, tanto científicos como autodidactas han trabajado para mejorar la magnificación y resolución de las imágenes observadas, donde a pesar de los avances en el perfeccionamiento de los diseños, los microscopios ópticos presentan limitaciones teóricas en la resolución debido a un límite intrínseco determinado por la longitud de onda de la luz visible. En contraste, los microscopios electrónicos, al utilizar electrones con longitudes de onda mucho menores, permiten reconstruir imágenes con una resolución significativamente mayor, superando las limitaciones de los microscopios ópticos.

De este modo, se establece que las interpretaciones del comportamiento dual de los fotones y electrones, junto con el símil entre los microscopios y su relación con la formación de imágenes, pueden aplicarse en la enseñanza de la física moderna. Esto convierte al SEM en una herramienta innovadora para la enseñanza de aspectos de la física en educación superior. El desarrollo de una propuesta educativa que involucre el SEM permitiría vincular aspectos teóricos y experimentales, facilitando la comprensión de la naturaleza dual de los electrones y estableciendo conexiones entre lo teórico y lo práctico.

### **1.3 Pregunta problema**

Esta investigación se sustenta con el trabajo de diferentes autores que han contribuido con una mejor comprensión del comportamiento de los electrones y su comportamiento en la formación de imágenes en un microscopio electrónico. Teniendo en cuenta esta información se plantea la siguiente pregunta: ¿De qué manera la formación de imágenes en un instrumento

científico como el SEM, desde una reconstrucción histórica, permite establecer a modo de propuesta, una ruta pedagógica que aborde aspectos de la física moderna a estudiantes de pregrado en ciencias?

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1. Objetivo General**

Reconocer, mediante la formación de imágenes en un instrumento científico como el Microscopio Electrónico de Barrido (SEM), su valor en la enseñanza del comportamiento dual de los electrones en la física moderna en la educación superior.

### **1.4.2. Objetivos Específicos**

Comprender el comportamiento dual de los electrones mediante el análisis de la formación de imágenes en un SEM, destacando la interacción electrón-materia que influye en dicho proceso.

Proponer el uso del SEM como un instrumento científico que permite estudiar las teorías modernas, contextualizándolo dentro de los procesos de enseñanza-aprendizaje en educación superior.

## **1.5 Aspectos Generales**

Este trabajo de investigación se ha estructurado en tres secciones. La primera se denomina “Problematización en la formación de imágenes en un MO y en un SEM” que aborda los elementos técnicos de los equipos relacionándolos con la formación de la imagen. Inicialmente, se interpreta como un problema netamente mecánico, puesto que las características del SEM se diferencian fácilmente de las de un microscopio convencional, como el óptico, por su robustez y alta tecnología en su construcción. Sin embargo, la diversidad de información necesaria para la manipulación de

---

este instrumento sobrepasa fácilmente las barreras de esta investigación, ya que es necesaria la intervención de diferentes factores para su completa manipulación. Por lo tanto, más allá de una elaboración epistemológica en torno al funcionamiento del equipo, se inicia la investigación con una reseña comparativa entre un MO y un SEM, estableciendo sus similitudes y principales diferencias, que son las que direccionan esta investigación.

Las disquisiciones de estos instrumentos empiezan a adquirir una notable desviación cuando se analiza el producto de la radiación emitida en cada uno de ellos, siendo para el MO los fotones y para el SEM los electrones. Justamente, esta diferencia se engloba y analiza en la segunda sección, titulada “La naturaleza dual de fotones y electrones en la microscopía óptica y electrónica.” Donde se interpreta la información obtenida mediante un tratamiento histórico cuyas dimensiones ameritan una interpretación desde un constructo semántico, permitiendo su análisis a la luz del propósito principal de esta investigación: la formación de imágenes, estas consideraciones se abordan con mayor precisión para los electrones, por ser la fuente de emisión de energía del SEM.

En esta sección se presentan las notables investigaciones y elaboraciones teóricas de J.J. Thomson en 1897, H. Hertz en 1883, L. De Broglie en 1923, C. Davisson y L. Germer en 1921, entre otros, como construcciones epistemológicas en torno al electrón, producto de intensos debates desarrollados en el siglo XIX y XX.

El tercer y último acápite, titulado “De la historia a la práctica”, retoma las contribuciones de D. Baird en 2004, D. Höttecke, A. Henke, y F. Riess, en 2010 y J. Malagón, M. Ayala y S. Sandoval, en 2011, para examinar cómo la interacción entre la historia, la epistemología y la experimentación, especialmente en relación con la formación de imágenes en microscopía, puede contribuir a la construcción del conocimiento.

El objetivo de esta sección se centra en las reflexiones sobre el papel que juegan los instrumentos científicos en la construcción del conocimiento. En este sentido, Baird (2004), argumenta que el conocimiento subjetivo sobre el funcionamiento de un equipo presenta limitaciones si se omiten las interpretaciones prácticas que encapsulan el saber en los propios instrumentos. Su análisis no se enfoca solo en el instrumento en sí, sino en cómo este refleja un tipo de conocimiento más profundo sobre la ciencia. A partir de esta perspectiva, el análisis del SEM permite reconocer la metateoría que emerge a través de la reconstrucción histórica del instrumento, proporcionando elementos históricos, experimentales e instrumentales. Estos elementos buscan promover una enseñanza crítica y contextualizada, fomentando tanto el discurso como la capacidad de innovación del docente. Todo esto culmina en una propuesta pedagógica innovadora que integra las concepciones en torno al electrón y la comprensión de su comportamiento a partir del funcionamiento y la formación de imágenes en un SEM.

---

**Capítulo 2. Problematización en la Formación de Imágenes en un MO y en un SEM****2.1. Caracterización del MO**

Entre los diversos instrumentos que han ampliado el espectro de la observación científica, el microscopio óptico destaca por sus grandes contribuciones en el campo de la ciencia, manteniendo su posición para explorar diferentes elementos en distintos momentos de la historia. A pesar del surgimiento de tecnologías de imagen más avanzadas, basadas en estos mismos principios ópticos, como la microscopía electrónica y la de fuerza atómica, el microscopio persiste como instrumento de introducción inicial en laboratorios e instituciones educativas debido a su facilidad para entender su funcionamiento y además su capacidad para examinar muestras sin alteraciones significativas.

Por consiguiente, es pertinente hablar del microscopio óptico, ya que proporciona el contexto necesario para entender el desarrollo de la microscopía electrónica. Al comparar la resolución limitada por la longitud de onda de la luz en los microscopios ópticos con la capacidad superior de los microscopios electrónicos, se logran establecer las relaciones en torno a la limitación o implicación del uso de cada tecnología; a su vez sustentar el andamiaje teórico con el microscopio óptico facilita la transición a conceptos más complejos como los empleados en la microscopía electrónica.

Para desarrollar este esquema teórico se inicia con la invención del microscopio óptico, que utiliza la luz a través de lentes de distintas geometrías y materiales para amplificar imágenes, transformando la manera en que se observan los objetos. Los orígenes de la microscopía y las cuestiones de cómo ha evolucionado esta técnica, se sitúa en la antigüedad, donde aproximadamente en el año 3000 a.C., se produjo vidrio por primera vez, como evidencian las

---

cuentas de cristal egipcias que datan del 2500 a.C. El lente más antiguo conocido, hecho de cristal de roca pulida y con un ancho de 4.0 cm, fue encontrado en la antigua Nínive, Mesopotamia. También se descubrieron lentes biconvexas en Creta, que se remontan a algún punto entre los años 3000 y 1200 a.C. Entre los años 965 y 1020, el erudito Ibn-al-Haitham, conocido también como Alhazen, utilizó espejos esféricos y parabólicos en sus investigaciones. Alrededor del año 1000 d.C, un inventor desconocido creó el primer dispositivo de ayuda visual, la piedra de leer, que era un segmento de una esfera de cristal capaz de amplificar letras cuando se colocaba sobre materiales de lectura (Sánchez y Oliva, 2015).

Una de las primeras aplicaciones de lentes para amplificar imágenes, y algunas de sus propiedades ópticas, como las superficies curvas, se extendieron a civilizaciones como la griega y la romana. Filósofos como Euclides y Ptolomeo estudiaron estas cuestiones y las reflejaron en sus escritos. Los antiguos conocían que los espejos curvos y las esferas de cristal llenas de agua podrían aumentar el tamaño de las imágenes. En el siglo XVI, Leonardo da Vinci y Francisco Maurolyco resaltaron las ventajas de las lentes para el estudio de pequeños objetos y durante las primeras décadas del siglo XVII, se comenzó a experimentar con lentes, llamadas así por su forma similar a las lentes, para lograr el mayor aumento posible (Padilla y Cerecedo, 2017).

Dadas las características proporcionadas por el telescopio, utilizado por primera vez con fines astronómicos por Galileo, se comenzaron a desarrollar instrumentos para aumentar la visión denominados microscopios<sup>1</sup>. En la misma línea de tiempo se reconoce que Hans Janssen y su hijo

---

<sup>1</sup> El uso de la palabra microscopio fue mencionada en 1625 por Federico Cesi y Francesco Stelluti en una publicación de la *Accademia dei Lincei*, que mencionaba las observaciones a una abeja (Falcón, 2014).

---

Zacharias Janssen construyeron el primer instrumento con lentes de aumento en 1590, basándose parcialmente en el sistema establecido por Galileo. Estos fabricantes de gafas holandeses crearon un aparato con lentes de aumento que marcó los principios del microscopio compuesto, combinando dos lentes convexas dentro de un tubo opaco, lo que permitió una observación más precisa de objetos pequeños. Este microscopio fue utilizado y perfeccionado por varios experimentadores y se dio a conocer internacionalmente. Su sistema óptico fue empleado en la astronomía por Johannes Kepler y Galileo Galilei en los siglos XVI y XVII. Entre 1609 y 1619, Cornelius Drebbel supuestamente creó un microscopio de dos lentes con un único objetivo convexo y un ocular. En 1637, René Descartes, en su obra *Dioptrique*, describió un microscopio compuesto con dos lentes, un ocular plano-cóncavo y un objetivo biconvexo. En 1659, el sacerdote jesuita alemán Athanasius Kircher, elabora un microscopio compuesto con un lente en cada extremo del tubo dispuesto horizontalmente (Sánchez y Oliva, 2015).

En este sentido, es posible observar cómo el instrumento se perfecciona para alcanzar mayor resolución mediante la reorganización de las disposiciones de las lentes, el ajuste en su geometría y su combinación, pero siendo limitado este proceso por la longitud de onda de la luz. Al mismo tiempo, esta herramienta amplía la imagen de los objetos y supone una transformación en las concepciones preexistentes sobre los mismos. Aunque se lograron avances significativos, se siguió perfeccionando el instrumento con el objetivo de incrementar su capacidad de amplificación, lo cual afecta también la interpretación de lo que está siendo observado. De esta manera, aquellos que utilizan el microscopio logran desarrollar una visión teórica más profunda al ajustar su comprensión con los nuevos detalles revelados gracias a la mayor magnificación y resolución de las imágenes.

Teniendo en cuenta lo anterior, reconocer los aspectos históricos cobra sentido en la medida en que se identifican los ajustes realizados para acceder a escalas más pequeñas. Por ello, la producción de Anton van Leeuwenhoek en el siglo XVII al construir un microscopio con objetivos de pequeño diámetro y corta distancia focal juega un papel central en el desarrollo de esta técnica. Sus observaciones le permitieron refutar la teoría de la generación espontánea, lo que favoreció la evolución de las primeras ideas de la biología celular, estos ajustes mejoraron la magnificación y la resolución de las imágenes, logrando reconocer diferencias en las muestras observadas caracterizando células sanguíneas, bacterias y estructuras de tejidos animales. Este instrumento tuvo su mayor repercusión en esta rama de la ciencia, ya que, por primera vez, se describieron en detalle pequeños organismos que habían pasado desapercibidos y eran completamente invisibles. Además, los anatomistas, centrados en el estudio del cuerpo humano, lograron estudiar estructuras hasta entonces inexploradas mediante los dos tipos de microscopios existentes, el sencillo, que consistía meramente en una lente montada, y el compuesto, que consistía en una combinación de lentes (Sánchez y Oliva, 2015).

Es interesante resaltar que estos avances instrumentales también fueron el punto de partida para el trabajo de *Micrographia* de Robert Hooke, quien en 1663 presentó sus observaciones del corcho, comentando sobre la célula y realizando varios dibujos detallados de insectos, semillas, cabellos y algunos objetos de uso común. Asimismo, otro de los usos importantes del microscopio en esa época fue el estudio de la circulación de los glóbulos rojos, realizado por Marcello Malpighi en 1665 (Sánchez y Oliva, 2015).

Hasta este punto se ha presentado una breve reseña histórica sobre el microscopio óptico, el cual puede clasificarse tanto por sus propiedades ópticas como por su disposición en sistemas

---

más complejos, ya sea en microscopios simples o compuestos, mostrando algunos de sus usos variados dentro de la ciencia. Si se pretende mostrar el uso del microscopio simple de Leeuwenhoek, es posible alcanzar un aumento de 480 veces el tamaño de los objetos utilizando una sola lente. Aunque este microscopio, a pesar de su simplicidad para la época, ofrecía un aumento mucho mayor que el de una lupa, su capacidad de aumento cambia según la organización de los lentes. Sin embargo, para la comparación con el SEM, se tomará en mayor medida las disposiciones e ideas construidas por el uso del microscopio óptico compuesto, estableciendo los parámetros generados por la óptica geométrica en relación con el comportamiento de la luz, que a pesar de establecerse como una onda electromagnética propagada en múltiples direcciones, su interacción se describe de manera simplificada, mediante rayos de luz que pasan a través de distintas lentes y son desviados con relación al ángulo de incidencia, la curvatura de la lente y el índice de refracción<sup>2</sup> del medio caracterizado bajo el principio de Fermat.

Este microscopio se caracteriza por tener un sistema mecánico, de iluminación y óptico. El sistema mecánico proporciona estabilidad y fuerza, facilitando su manejo, sosteniendo el sistema óptico y variando la distancia entre las lentes para enfocar lo que se desea observar. Por otro lado, la iluminación es la fuente principal para lograr observar la muestra, donde dependiendo del sistema óptico se aumenta la imagen en relación con la refracción de los rayos de luz que pasan a través de los lentes, modificando el tamaño de las imágenes al concentrarse o dispersarse.

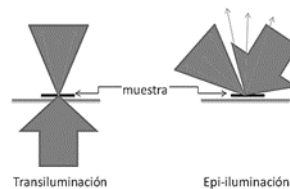
---

<sup>2</sup> Es importante mencionar que la desviación en el haz de luz puede variar debido a la modificación de la longitud de la onda utilizada, un elemento que es propio de los conceptos ondulatorios.

La forma en la que se emplea la luz presenta dos tipos de mecanismos: la transiluminación, que traspasa directamente la muestra, y la epi-iluminación, como se muestra en la figura 1, en la que el rayo de luz incide de manera oblicua sobre la muestra.

**Figura 1.**

*Incidencia de la luz sobre la muestra*



*Nota.* La figura representa la incidencia de la luz sobre la muestra en diferentes ángulos, clasificándola según el mecanismo presentado, en transiluminación y Epi-iluminación. Tomado de Narváez (2004).

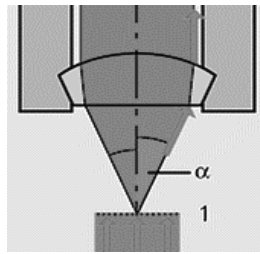
Sin embargo, cada incidencia de la luz en la muestra, luego de chocar o cruzar, pasa a través de lentes con distintas geometrías, ya sean convergentes o divergentes, dependiendo de la configuración del microscopio, teniendo como finalidad aumentar el tamaño de la imagen, no obstante, considerar únicamente el aumento no es suficiente, de la misma manera para obtener una imagen clara debe pensarse en la resolución otorgada por esta disposición de lentes (Narváez, 2004).

Si bien el poder de aumento de una imagen se fundamenta en la curvatura del lente y la distancia focal, las cuales se encuentran relacionadas de manera inversamente proporcional, es decir que a mayor curvatura, la distancia focal disminuye, produciendo un aumento de la imagen, y viceversa, existe la dificultad de pérdida de detalles a medida que se obtienen aumentos significativos porque una sola lente no es suficiente, y es aquí cuando se hace necesario verificar el concepto de resolución que como lo establece Megías, Molist y Pombal (2024), es la distancia mínima sobre la cual se logran percibir dos puntos aislados que se encuentran muy próximos entre

sí, esta distancia se conoce como el límite de resolución, cuantos más rayos sean recogidos por la lente después de pasar por el objetivo, mayor será la resolución del microscopio, conocido como apertura numérica (AN), además se tiene en cuenta un ángulo máximo de captación de luz influenciado por el índice de refracción de la lente como se muestra en la figura 2. Se puede mencionar entonces que, a mayor apertura numérica, mayor cantidad de luz estará en el objetivo y, así el poder de resolución aumentará.

**Figura 2.**

*Ángulo formado por el haz*

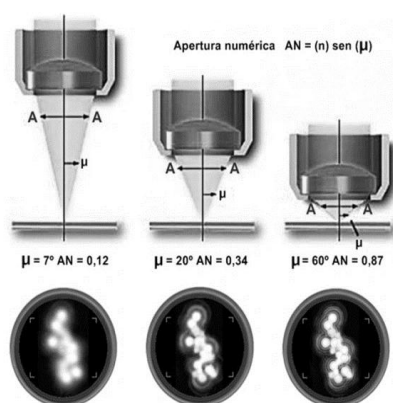


*Nota.* La figura representa un cono de luz indicando la mitad del ángulo formado respecto a la vertical, al incidir sobre la muestra. Tomado de Narváez (2004).

Existen otras maneras de mejorar la resolución de la imagen. La primera consiste en crear un cono de luz mayor con otros tipos de lentes denominados lentes condensadores, los cuales aumentan el ángulo, como se muestra en la figura 3. Para la segunda forma de mejorar la resolución, si se dispone de un elemento con índice de refracción similar al del vidrio y se ubica entre el cubreobjeto y el objetivo, se eliminará parte de la difracción de los rayos de luz, mejorando la resolución.

Figura 3.

Mejora en la resolución de una imagen



*Nota.* La imagen muestra cómo el cambio en la apertura numérica incrementa la cantidad de rayos de luz capturados, evidenciando una mejora en la resolución a medida que aumenta el ángulo  $\mu$ . Tomado de Díaz y Caballero (2016).

La resolución, por tanto, es un parámetro crítico porque determina la capacidad de distinguir detalles finos en una muestra, a su vez está limitada por el fenómeno de difracción de la luz, estableciendo un límite teórico conocido como el límite de resolución el cual se caracteriza por su capacidad de distinguir entre dos puntos próximos en el espacio de muestra, esto depende de cómo se perciben esos puntos, que aparecen como manchas de difracción en lugar de puntos perfectamente nítidos. Las manchas de difracción representan la dispersión de la luz al pasar por los bordes de los objetos en la muestra y contribuyen al hecho de que los puntos cercanos no se ven como puntos individuales, sino como áreas difusas o manchas (Wegerhoff, Weidlich y Kässens, 2006). Cuanto más pequeñas sean estas manchas de difracción, mejor será la resolución, lo que permitirá acercar dos puntos y aún distinguirlos como entidades separadas. Sin embargo, la limitación fundamental radica en que, debido a la longitud de onda de la luz visible, existe un límite intrínseco que impide observar detalles por debajo de cierto tamaño, lo que se conoce como, límite de difracción de Abbe.

---

Este límite se representa mediante la ecuación 1, la cual determina la magnificación total obtenida por el sistema óptico y, en consecuencia, la resolución de la imagen. Además, de esto, la ecuación no solo calcula cómo la combinación de los lentes objetivo y ocular amplifica la imagen de la muestra observada, sino que también establece el límite de resolución, dado que considera el rango de la longitud de onda de luz visible de la siguiente manera:

$$\delta = \frac{\lambda}{2AN} \quad (1)$$

Donde  $\delta$  es la distancia mínima entre dos puntos que pueden ser distinguidos y  $\lambda$  es la longitud de onda de la luz, mostrando que la capacidad de resolución aumenta a medida que disminuye la longitud de onda o se incrementa la AN. Sin embargo, la luz visible tiene longitudes de onda que varían entre 400 nm y 750 nm, lo cual impone un límite en la resolución que puede ser alcanzada. Este límite implica que estructuras menores a 0,275  $\mu\text{m}$  no son visibles con microscopios ópticos convencionales, de tal manera que esta ecuación permite definir el límite de resolución y muestra cómo la capacidad de los lentes para resolver detalles se ve restringida por las características de la luz visible.

Analizando el cociente entre  $\lambda$  y  $2AN$ , se pueden establecer distintas relaciones, por un lado,  $\lambda$  y  $\delta$  guardan una proporcionalidad directa es decir que a medida que  $\lambda$  aumenta,  $\delta$  también aumenta, esto significa que longitudes de onda más largas resultan en un límite de resolución mayor generando una resolución peor. Por otro lado, la relación de AN y  $\delta$  muestra que si una aumenta, la otra disminuye, lo que implica que una mayor AN resulta en un límite de resolución menor generando mejor resolución.

**Figura 4.**

*Polvo de Alas de Mariposa*



*Nota.* La imagen muestra polvo de alas de mariposa a diferentes escalas, de izq. a der. Bajo un lente de 4X, 10X y 40X. Tomado de Pérez (2016).

Por lo tanto, a menor longitud de onda, menor tamaño de mancha de difracción y mejor resolución. A su vez, si existe mayor AN, se enfoca más el haz de luz y se reduce la difracción, mejorando la resolución, como se observa en la figura 4. También, una longitud de onda menor formará una imagen con mayor resolución, como en el caso de los rayos UV. Así, la resolución está limitada por la difracción, pero puede optimizarse al reducir la  $\lambda$  y aumentar la AN, (Wegerhoff, Weidlich y Kässens, 2006).

Para ilustrar cómo la longitud de onda afecta la resolución, se puede considerar el uso de ondas acústicas en ecografías. Las ondas ultrasónicas, que tienen longitudes de onda mucho mayores en comparación con la luz visible, pueden penetrar cuerpos no transparentes. Sin embargo, debido a su mayor longitud de onda, la resolución obtenida es mucho menor en comparación con la luz visible, (Martínez, Vitola y Sandoval, 2007). Las ondas ultrasónicas pueden ser útiles para examinar estructuras internas del cuerpo, pero no pueden proporcionar el nivel de detalle que es posible con técnicas que utilizan longitudes de onda más cortas, como los rayos X ( $10^{-2}\text{Å}$  y  $10^2\text{Å}$ ) o los electrones ( $2.43 \cdot 10^{-12}\text{m}$ ). Esto explica por qué técnicas como las

usadas en la microscopía electrónica logran una resolución significativamente superior, dado que los electrones tienen longitudes de onda de un orden menor que la de los fotones.

## **2.2. Caracterización del SEM**

La convergencia de la física, la ingeniería y la ciencia de materiales ha dado lugar a herramientas de observación, entre las cuales se destaca el SEM por su capacidad para generar imágenes de la materia a una escala distinta. Esta sinergia interdisciplinaria muestra la relación de diversos campos del conocimiento que puede converger en instrumentos como el SEM, estableciendo así la importancia de describir detalladamente sus partes como la fuente de emisión de electrones, las lentes electromagnéticas, el sistema de vacío y otros componentes clave explicando su función. Al destacar el papel de estos componentes en la capacidad del SEM para generar imágenes de alta resolución, se reafirma su importancia como instrumento para entender algunas de las teorías modernas.

En el siglo XIX, con el desarrollo de la teoría ondulatoria, se logran significativos avances en el conocimiento de la formación y captura de imágenes. Uno de los investigadores que mayores aportes realizó a la microscopía fue Joseph von Fraunhofer en el siglo XIX, tanto en el campo teórico como experimental. En la parte experimental desarrolló el sistema de lente óptico con corrección a la aberración cromática, conocido como el sistema achromat, y en la teoría planteó conocimientos básicos sobre la difracción de la luz (Alfonso, 2009).

Según Valles (2020), una mejora en la configuración del microscopio óptico fue realizada por Carl Zeiss, quien equipó el microscopio con un ocular y un objetivo, el cual denominó Stativ 1. A solicitud de Zeiss, Ernst Abbe proporcionó las bases teóricas que hicieron posible la

---

producción de diecisiete objetivos diferentes, incluyendo tres sistemas de inmersión, lo que significó un progreso en la calidad de la imagen obtenida. Este trabajo está muy relacionado con las investigaciones realizadas por el profesor August Köhler (1866-1948), quien en 1883 publicó las directrices para el sistema correcto de iluminación de muestras en el microscopio, sistema que hizo posible usar el poder de resolución definido por la teoría Abbe en los objetivos, y además incorporó al equipo una lente condensadora.

Desde 1660 hasta la actualidad el microscopio óptico ha permitido desarrollar el conocimiento de la materia; sin embargo, un microscopio de luz, aun con lentes e iluminación perfecta, simplemente no tiene la capacidad para distinguir objetos que sean más pequeños que la mitad de la longitud de onda de la luz, la cual tiene un valor promedio de  $0.55 \mu\text{m}$ . Por ejemplo, como ya se mencionó, si se tienen dos líneas que estén más próximas que  $0.275 \mu\text{m}$ , serán vistas como una sola línea, y cualquier objeto con un diámetro más pequeño no será perceptible (Alfonso, 2009).

El microscopio electrónico, construido por los alemanes Ernst Ruska y Max Knoll en 1931, supera el inconveniente anteriormente planteado. Este microscopio emplea un haz de electrones en lugar de luz para enfocar la muestra. Las imágenes obtenidas eran muy deficientes y de calidad inferior a las que ofrecían los microscopios convencionales de la época, con magnificaciones de solo 2000 aumentos. En 1937, James Hillier logró 7000 aumentos y posteriormente contribuyó a la construcción de equipos con una capacidad de dos millones de aumentos (Alfonso, 2009). Con el perfeccionamiento de esta tecnología, surgieron distintas variantes de microscopios electrónicos, entre ellas el SEM.

Un SEM se compone de varias partes esenciales que permiten mayor resolución en comparación con el MO, como la fuente de emisión con la relación de cátodo ánodo que acelera el voltaje y modifica la longitud de onda clave para magnificar la imagen y superar lo planteado por Abbe y las lentes magnéticas que magnifican o desmagnifican el diámetro del haz enfocándose; estas partes desempeñan funciones específicas en la interacción con la muestra, lo que permite la generación de imágenes en un ordenador. A continuación, se detallan estas partes junto con sus implicaciones y cómo interfieren en este proceso.

### **2.2.1. Fuente de Emisión de Electrones**

En un SEM, las imágenes se producen a través de la interacción de electrones con la muestra. Los electrones, que se dispersan y absorben fuertemente tras interactuar con el sólido, estos pueden ser generados a partir de una fuente de emisión de campo, como un filamento de tungsteno o hexaboruro de lantano. Según Alfonso (2009), este proceso comienza calentando el filamento, cátodo, mediante un potencial eléctrico, lo que induce la emisión termoiónica de electrones y crea un flujo constante de estos, posteriormente son acelerados por un potencial positivo, ánodo, hacia la columna, formando un haz de electrones enfocado.

Actualmente, el SEM utiliza diversas fuentes para generar el haz de electrones necesario aparte del filamento de tungsteno. Cada tipo de fuente tiene sus propias características en términos de brillo, vida útil y estabilidad del haz, lo que influye en la calidad y resolución de las imágenes obtenidas. Sin embargo, el hexaboruro de cerio ( $CeB_6$ ) se privilegia para ser usado como material para filamentos en los SEM debido a sus propiedades eléctricas y de emisión de electrones altamente favorables, en estos tres aspectos.

---

En primer lugar, la brillancia de la fuente de electrones en el SEM se relaciona con la corriente del haz de electrones por unidad de área y ángulo sólido. Cuanto mayor sea la cantidad de electrones disponibles en un área pequeña, mejor será la capacidad del SEM para obtener imágenes de alta resolución con grandes magnificaciones. La brillancia aumenta linealmente con la tensión de aceleración aplicada a la fuente de electrones; por ejemplo, cualquier fuente de electrones es aproximadamente diez veces más brillante a una tensión de 10 kV en comparación con 1 kV (Thermo Fisher Scientific, 2006), de tal forma que el CeB<sub>6</sub> proporciona una luminosidad diez veces superior a la del Tungsteno.

En segundo lugar, se puede considerar el tamaño del área final del haz de electrones que puede reducirse para mejorar la resolución de la imagen. Sin embargo, la limitación última en la calidad de la imagen está determinada por la relación señal ruido, es decir, la proporción entre la intensidad de la señal útil y la intensidad de las interferencias no deseadas, considerando aquellos factores que la afectan, la corriente del haz, las condiciones del vacío o la calidad de los detectores. Por ejemplo, un tamaño de spot<sup>3</sup> más pequeño contribuye significativamente a una mejor resolución de imagen, permitiendo así obtener imágenes de alta calidad. Dentro de la columna de electrones del SEM, las lentes, especialmente la lente condensadora, son responsables de reducir el diámetro del haz o el tamaño del spot (Thermo Fisher Scientific, 2006).

---

<sup>3</sup> El spot es el diámetro del haz de electrones al impactar la muestra. Un spot más pequeño permite una mayor precisión en la observación de detalles finos en la muestra, ya que el haz se enfoca en un área más reducida (Thermo Fisher Scientific, 2006).

---

En tercer lugar, es posible establecer que la temperatura de la fuente también caracteriza el haz de electrones, ya que es la temperatura a la cual se supera la función de trabajo<sup>4</sup> y se inicia la emisión de electrones; en las fuentes termoiónicas, esta temperatura operativa varía entre 1800 y 2800 Kelvin.

### **2.2.2. Emisión de electrones en la fuente**

Luego de caracterizar el filamento de la emisión termoiónica CeB<sub>6</sub> se puede mencionar la calidad de la resolución de la imagen del SEM, la cual debe producir un haz de electrones coherente, es decir de alta densidad y energía uniforme, lo que permite una exploración precisa de la superficie de la muestra. Así, la densidad de Corriente de Emisión indica la cantidad de electrones que la fuente de emisión libera por unidad de área. Esta propiedad se refiere a la cantidad de electrones emitidos desde una superficie específica de la fuente en un tiempo dado por lo que a una mayor densidad de corriente de emisión se está generando un flujo más intenso de electrones, siendo entonces la modificación del voltaje aplicado la manera en que se acelera los electrones y se controla su energía (Thermo Fisher Scientific, 2006).

Ahora bien, el haz de electrones puede ser focalizado utilizando campos electrostáticos o magnéticos. Sin embargo, el uso de campos magnéticos para controlar el haz de electrones es preferido debido a que este método presenta menos aberraciones en comparación con el campo electrostático. En este contexto, se emplean bobinas de alambre, es decir, electroimanes, para generar el campo magnético necesario. La corriente aplicada en estas bobinas permite ajustar las

---

<sup>4</sup> La función de trabajo se relaciona con la cantidad de energía necesaria para vencer la atracción de los electrones al material.

---

trayectorias de los electrones con precisión. A pesar de la ventaja del campo magnético en la reducción de aberraciones, las lentes electromagnéticas que se utilizan para enfocar el haz, aún tienen un desempeño inferior en comparación con las lentes de vidrio tradicionales en cuanto a las aberraciones. Las lentes son capaces de magnificar o desmagnificar el diámetro del haz debido a su resistencia variable, lo que resulta en una longitud focal ajustable. En el SEM, se utilizan estas lentes específicamente para desmagnificar la imagen de la fuente de emisión, permitiendo la formación estrecha del haz sobre la superficie de la muestra para un análisis detallado (Thermo Fisher Scientific, 2006).

Este sistema, conocido como cañón de emisión termoiónica, utiliza un filamento calentado para generar electrones, que luego son acelerados, focalizados y dirigidos hacia la muestra, donde interactúan y producen información que luego se transforma en una imagen.

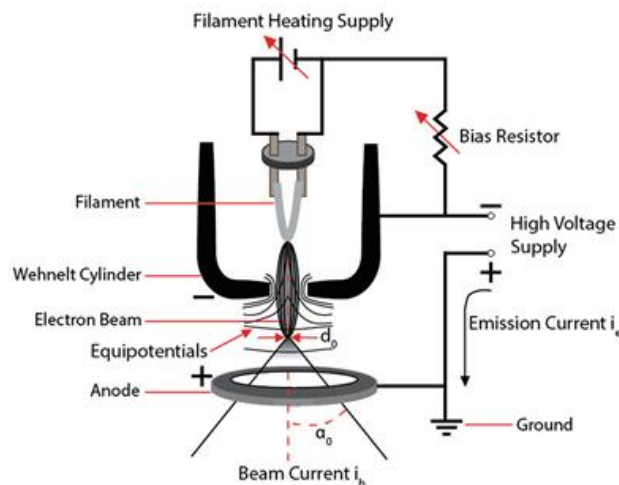
En el primer paso, el filamento de tungsteno en forma de V es calentado por un suministro de corriente a temperaturas de hasta 2500 °C, lo que provoca la emisión de electrones debido a la energía térmica adquirida por el filamento, los electrones en la punta reciben suficiente energía térmica para superar la función de trabajo relativamente alta de 4.5 eV, este proceso, es conocido como emisión termoiónica, siendo el área de emisión de electrones de alrededor de 100  $\mu\text{m}$  - 150  $\mu\text{m}$  (Ul-Hamid, 2018). El filamento de tungsteno es el más utilizado por los SEM dado que, es ideal para este propósito debido a su alto punto de fusión y baja presión de vapor, lo que permite que mantenga su integridad a las temperaturas elevadas requeridas para la emisión electrónica, con un menor desgaste en el tiempo.

Una vez que los electrones son emitidos desde el filamento, son controlados y enfocados por el cilindro de Wehnelt, figura 5, que aplica una pequeña tensión negativa al filamento. Esta

tensión actúa como un mecanismo de regulación que ajusta el flujo de electrones, impidiendo que una cantidad excesiva de electrones se disperse sin control y concentrándolos en un haz fino y coherente. La relación del cilindro Wehnelt y el cátodo del filamento asegura que los electrones se emiten solo desde un área del filamento cercana a la punta, esto enfoca el haz y controla la emisión de electrones y el ángulo de divergencia  $\alpha_0$ . El cilindro de Wehnelt, controla el haz de electrones, garantizando que este se dirija adecuadamente hacia la muestra (Ul-Hamid, 2018).

**Figura 5.**

*Esquema de un típico cañón de electrones de emisión termoiónica de tungsteno*



*Nota:* La imagen presenta el proceso de emisión, aceleración y control del haz de electrones en un SEM. El filamento de tungsteno emite los electrones, que son controlados y enfocados por el cilindro de Wehnelt y el ánodo, acelerados por un alto voltaje, y finalmente dirigidos hacia la muestra para obtener imágenes con alta resolución a través de la interacción de los electrones con la superficie de la muestra. Tomado de Ul-Hamid (2018).

El ánodo es el siguiente componente que actúa en el trayecto de los electrones. Este electrodo, cargado positivamente, atrae a los electrones emitidos desde el filamento y ayuda a acelerarlos hacia la muestra, el ánodo permite que solo una fracción de electrones pase a través de él (Ul-Hamid, 2018). La diferencia de potencial generada entre el filamento y el ánodo, suministrada por una fuente de alto voltaje, hace que los electrones alcancen energías cinéticas

---

adecuadas para interactuar con la superficie de la muestra en el SEM. Cuanto mayor sea la tensión aplicada, mayor será la energía de los electrones, lo que resulta en una mayor penetración en la muestra y una mejor resolución en las imágenes obtenidas.

Este constructo técnico ha permitido deducir que las ideas de producción de electrones utilizadas en el SEM consideran la teoría y la práctica llevada a cabo por Thomson sobre partículas cargadas, ya que principalmente muestra una comprensión de los materiales utilizados en los filamentos los cuales pueden generar electrones por emisión termoiónica.

A su vez la producción de electrones en el SEM, impulsada por una diferencia de potencial cuidadosamente controlada, está basada con la producción del haz en el tubo de rayos catódicos, mostrando que estos elementos se basan en teorías que continúan evolucionando, y de esta manera se evidencia que la ciencia es un proceso dinámico cuyo conocimiento se ve enriquecido por diferentes elementos que en conjunto también permiten comprender el SEM.

Por tanto, el hecho de que exista un control sobre el haz de electrones y un conocimiento en torno a los materiales empleados ha logrado que se permita manejar un rango de longitud de onda de electrones mediante la diferencia de potencial y con ello superando el problema teórico del límite de resolución de Abbe, magnificando la imagen en un espectro superior al alcanzado por el MO.

### **2.2.3. Lentes electromagnéticas**

El sistema óptico de un SEM está constituido por lentes electromagnéticas, unas conocidas como condensadoras y otras como objetivas, además de aperturas, estigmatizadores y bobinas de escaneo. La función principal de estos componentes es crear un haz de electrones fino que recorre

---

el área de interés de la muestra en un patrón raster<sup>5</sup>. A diferencia de los microscopios ópticos o de transmisión, las lentes electromagnéticas en el SEM no forman imágenes de la manera convencional; su propósito es desmagnificar o enfocar el haz de electrones generado por el cañón electrónico (UI-Hamid, 2018). Para lograr esto, generalmente se utilizan dos lentes condensadoras seguidas de una lente objetiva, que es la encargada de formar la sonda fina en la superficie de la muestra.

El diámetro del haz de electrones que emana de un cañón de filamento de tungsteno típico es de aproximadamente 50  $\mu\text{m}$ , lo que requiere una reducción de entre 100 y 5000 veces, para obtener un tamaño de sonda útil de entre 0.5  $\mu\text{m}$  y 10 nm, adecuado para la imagen y análisis microquímico (UI-Hamid, 2018). Para lograr una gran desmagnificación, pueden ser necesarias hasta tres lentes condensadoras, sin embargo, dos son suficientes para los diámetros de haz pequeños producidos por cañones de emisión de campo.

Estas lentes funcionan de manera similar a las lentes convexas en la microscopía óptica, pero están compuestas por bobinas de cobre encerradas en una carcasa de hierro con piezas polares cilíndricas (UI-Hamid, 2018). Al aplicar corriente continua a estas bobinas, se genera un campo magnético concentrado, el cual ejerce una fuerza sobre los electrones que atraviesan el sistema, esta fuerza se define como la relación entre el campo magnético, la velocidad y carga del electrón además del ángulo formado entre el campo y la dirección en que se desplaza el electrón.

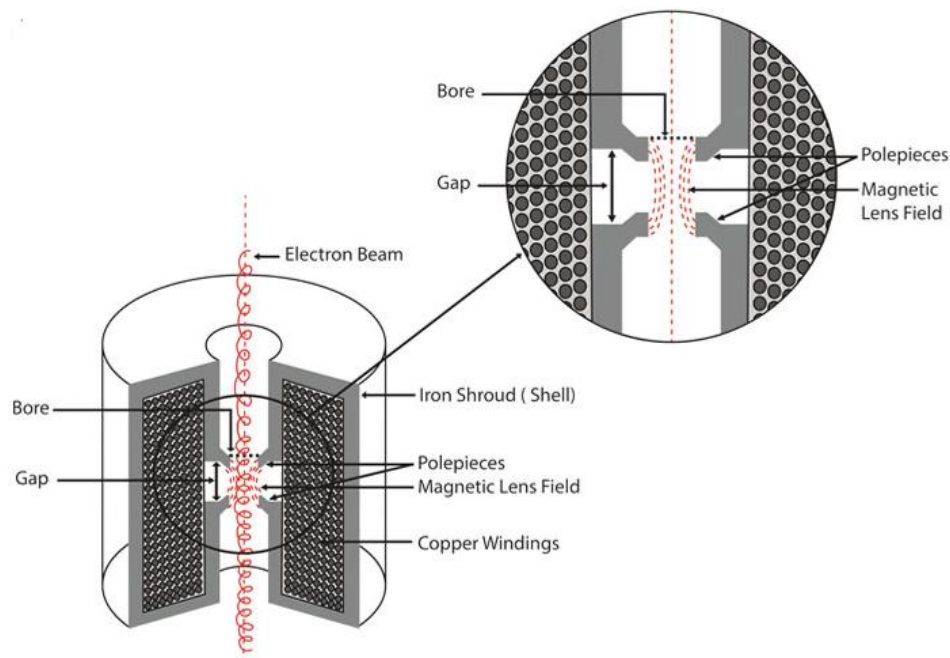
---

<sup>5</sup> Un patrón raster es una técnica de escaneo que consiste en mover un haz, como el de un microscopio electrónico, en un patrón en forma de líneas horizontales y verticales. Este método permite examinar áreas específicas de un objeto de manera sistemática, registrando datos de cada punto antes de pasar al siguiente. Así, se generan imágenes compuestas que reflejan en detalle las características de la superficie la muestra (UI-Hamid, 2018).

El campo magnético cuenta con un componente radial que es un campo magnético perpendicular al eje y un componente axial o longitudinal con un campo magnético paralelo al eje óptico. El componente radial provoca que los electrones que están fuera del eje se muevan hacia abajo a lo largo del eje óptico en una trayectoria helicoidal, como se ilustra en la figura 6, la interacción entre los electrones y el campo magnético desvía los electrones hacia el eje, creando así un efecto de enfoque, donde electrones que están más alejados del eje óptico son desviados con mayor fuerza que aquellos que están más cerca (Ul-Hamid, 2018). Esto muestra que a diferencia de las lentes ópticas que tienen una distancia focal fija, las bobinas en las lentes electromagnéticas permiten modificar la distancia focal cambiando la corriente.

**Figura 6.**

*Diagrama de lente electromagnética en un SEM*



*Nota.* La imagen muestra una lente magnética solenoidal utilizada en un SEM. El haz de electrones es enfocado a medida que pasa por el espacio entre las piezas polares (polepieces), donde el campo magnético generado por las bobinas de cobre (copper windings) ajusta la trayectoria de los electrones, que se desplazan de forma helicoidal. Tomado de Ul-Hamid (2018).

Los diferentes tipos de lentes regulan la apertura y limitan el diámetro del haz, mejorando la resolución al reducir la aberración esférica, cada una de estas lentes posee una disposición magnética distinta, es decir, una geometría diferente que modifica la intensidad del campo.

Todas estas comprensiones, aunque específicas del instrumento, una vez evidenciadas, pueden ser análogas a experimentos realizados por científicos de los siglos XIX y XX que buscaban interpretar un fenómeno, imposibles de observar en condiciones naturales. Entre estos científicos se destacan J.J. Thomson en 1897, H. Hertz en 1883 y H. Busch en 1927, cuyas interpretaciones han enriquecido la comprensión en torno al SEM, con ello se ha consolidado un constructo sólido sobre la formación de imágenes.

#### **2.2.4. Formación de la imagen**

Para lograr introducir la idea de la formación de la imagen es necesario recordar el patrón raster, que va guiando el haz, el cual permite un escaneo en diferentes puntos de la muestra de forma secuencial, permaneciendo en cada punto por un tiempo determinado antes de moverse al siguiente. La velocidad del escaneo es ajustable a través del software, donde los barridos más lentos proporcionan imágenes más claras al reducir el ruido electrónico, aunque también pueden ocasionar el desplazamiento de la imagen, lo que resulta en imágenes borrosas, o en algunas líneas que no pertenecen a la muestra.

Ahora bien, el choque de los electrones en la muestra implica que se formen tres tipos de señales denominadas electrones secundarios (SE), electrones retrodispersados (BSE) y rayos X. Según Ul-Hamid (2018), el proceso comienza cuando son captados por una jaula de Faraday y dirigidos hacia un centelleador, que puede estar hecho de diversos materiales como plástico,

emisor de luz dopado o cristales, convierte la información de los electrones en fotones. La superficie del centelleador está recubierta con una fina capa metálica y tiene una diferencia de potencial para acelerar los electrones entrantes, pasando a un tubo fotomultiplicador debido a su baja energía, para así procesar la señal y digitalizarla<sup>6</sup>.

A medida que los electrones viajan cerca del eje óptico dentro del microscopio, proporcionan una imagen de alta resolución producto de choques elásticos e inelásticos<sup>7</sup> con los electrones atómicos de la muestra. Esto puede resultar en la emisión de los electrones en la muestra<sup>8</sup>. Sin embargo, esta descripción general no captura completamente el complejo comportamiento de los electrones, que está influenciado por variables como la fuente de

---

<sup>6</sup> Según Egerton (2005), aunque el comportamiento de los electrones a menudo puede entenderse tratándolos como partículas, algunas propiedades, como la distribución de intensidad dentro de un patrón de difracción de electrones, requieren una descripción de onda. Pero cuando se visualiza una imagen o patrón de difracción en una pantalla fluorescente o se fotografía utilizando una película o una cámara CCD (sensor que absorbe la luz y la transforma en carga eléctrica), solo se registra la intensidad o amplitud de la onda de electrones se pierde toda la información sobre la fase de la onda que llega al plano de grabación, esta fase lleva información adicional sobre los campos eléctricos y magnéticos que pueden estar presentes en la muestra.

En la grabación holográfica, las ondas de electrones o de luz que provienen de una muestra se mezclan con una onda de referencia. El patrón de interferencia resultante, llamado holograma, es sensible a la fase de la onda en la superficie de salida de la muestra. Así que, aunque se graba solo como una distribución de intensidad, el holograma contiene información tanto de amplitud como de fase, que se puede extraer mediante un procedimiento de reconstrucción. Este procedimiento implica interferencia entre el registro holográfico y una onda de reconstrucción, que no necesariamente tiene la misma longitud de onda o incluso el mismo tipo de radiación.

En el SEM, en lugar de utilizar reconstrucción óptica, es más conveniente transferir el holograma, utilizando una cámara CCD a una computadora, que puede simular el efecto del procesamiento óptico ejecutando un programa que reconstruye la onda de imagen compleja. Este proceso implica calcular la transformada de Fourier bidimensional de la intensidad del holograma, esencialmente su espectro de frecuencia y seleccionar una porción fuera del eje de la transformada, que representa la modulación del patrón de franjas sinusoidales. Tomar una transformada de Fourier inversa de estos datos seleccionados produce dos imágenes: las partes real e imaginaria del holograma procesado que representan las armónicas de coseno y seno, a partir de las cuales se puede calcular la fase y amplitud de la onda de salida de electrones, es decir, la onda en la superficie de salida de la muestra. La imagen de fase es particularmente valiosa, ya que puede revelar cambios en el potencial magnético o químico de la muestra.

<sup>7</sup> La interacción de estos electrones con la muestra puede ser elástica, donde los electrones cambian de dirección, pero mantienen su energía cinética común, proceso ocurrido para producir los BSE, o inelástica, donde los electrones pierden energía al interactuar con la muestra, produciendo de esta manera los SE y los electrones de Auger.

<sup>8</sup> Los electrones emitidos entre el haz primario con los electrones de la muestra son denominados, SE, BSE y de Auger.

---

iluminación, la velocidad de los electrones, los condensadores y el radio atómico de la muestra. Estos factores contribuyen conjuntamente a la obtención de imágenes de alta resolución.

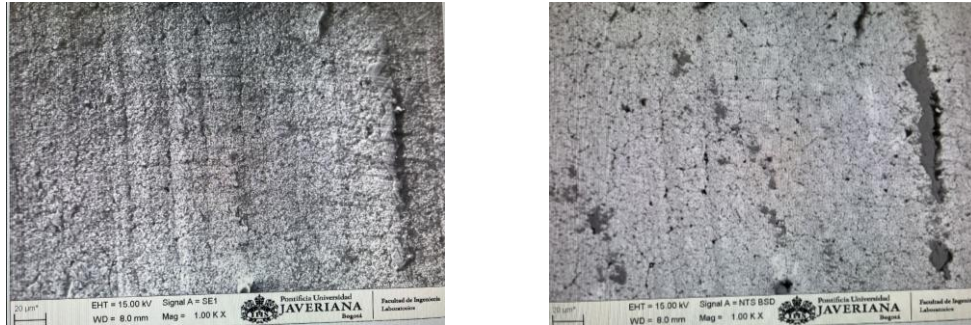
Reimer (1998), explica que el SEM puede obtener imágenes y analizar muestras a granel. El principio del SEM implica la aceleración de electrones desde cátodos de emisión termoiónica, Schottky o de campo a través de una diferencia de voltaje entre el cátodo y el ánodo, que puede variar desde 0.1 keV hasta 50 keV. La sección transversal del haz más pequeña, o cruce, con un diámetro de aproximadamente  $10^{-50}$   $\mu\text{m}$  para la emisión termoiónica o  $10^{-100}$  nm para fuentes Schottky o de emisión de campo, se magnifica mediante un sistema de lentes electrónicos de dos o tres etapas. Esto crea una sonda de electrones con un diámetro de 1.0 nm a 10.0 nm que transporta una corriente de sonda de electrones de  $10^{-9}$  a  $10^{-12}$   $\text{\AA}$  en la superficie de la muestra. Para modos de operación que requieren corrientes de sonda más altas, de aproximadamente  $10^{-8}$   $\text{\AA}$ , el diámetro de la sonda aumenta a aproximadamente 0.1  $\mu\text{m}$ . Cuando la distancia entre la muestra y la pieza polar inferior de la lente final de formación de la sonda es relativamente larga, unos pocos mm o cm, los distintos electrones y fotones emitidos pueden ser registrados por detectores dentro de la cámara de muestras, siendo muy bajo el campo magnético en la muestra.

A partir de la relación entre sonda y detector, el equipo puede hacer una lectura de los SE, de baja energía, que son expulsados de las capas externas de los átomos de la muestra y proporcionan información detallada sobre la topografía, mientras que los BSE, de mayor energía, ofrecen contraste composicional, ya que los elementos más pesados producen más BSE y en el caso de los electrones Auger, específicos de cada elemento, se utilizan para análisis químico superficial. El SEM cuenta con diferentes detectores que reciben a los electrones teniendo en

cuenta su energía cinética e interpretando esta información para generar la imagen dependiendo del electrón recibido, figura 7.

**Figura 7.**

*Imagen topográfica y de composición de una lámina metálica*



*Nota.* La imagen de la izquierda proporciona información topográfica a partir de SE y la de la derecha es una imagen de la misma muestra mostrando información de composición a partir de los BSE. Para analizar esta imagen con más detalle se necesita información que proporciona el equipo como gráficas y datos. *Tomado de los laboratorios de microscopía electrónica de la Pontificia Universidad Javeriana de Bogotá.*

Estas imágenes nos permiten comprender que cada electrón es leído por un detector específico y esta información garantiza que se genere la imagen, dependiendo del electrón, a escala de grises y tridimensionales; por otro lado, la cantidad de energía modifica la longitud de onda del electrón y como consecuencia la resolución de la imagen, pues se concibe una relación entre la tensión aplicada, la longitud de onda y la resolución alcanzada. Por último, las imágenes también son alteradas con la posición de la muestra con respecto al haz primario, este proceso es similar al del MO, acercando o alejando la muestra del haz para mejorar la resolución, a partir de la energía cinética de los electrones obtenidos.

---

**Capítulo 3. El comportamiento dual de fotones y electrones en la microscopía óptica y electrónica**

Después de explicar cada uno de los microscopios y demostrar que existen varios puntos de comparación en cuanto a sus elementos, así como una diferenciación clave en la fuente utilizada, resulta pertinente abordar los procesos investigativos a lo largo de la historia de manera conceptual, centrando la atención en los fotones y electrones. En particular, explorar su comportamiento dual como ondas y partículas, dado que, en la historia de la física, diversos experimentos y teorías han mostrado la complejidad de estas entidades, estas no se caracterizan de manera puramente ondulatoria ni exclusivamente corpuscular, sino como una combinación de ambos comportamientos. Esta dualidad, aunque inicialmente fue considerada una curiosidad teórica, se ha convertido en un elemento que posibilita la comprensión de fenómenos subatómicos y ha dado lugar a aplicaciones tecnológicas, como la formación de imágenes en un SEM e incluso en su misma construcción.

Por consiguiente, en esta sección se traza un recorrido por los principales desarrollos científicos que llevaron a la consolidación del comportamiento dual de los fotones y de los electrones, mostrando cómo estos avances fueron determinantes para la creación y perfeccionamiento del SEM. Aunque inicialmente la discusión sobre la dualidad tenía un enfoque predominantemente teórico y experimental, con el tiempo permitió avances significativos en la microscopía, estos avances facilitaron la obtención de imágenes de alta resolución a nivel subatómico, demostrando que una comprensión profunda de estos conceptos permite entender plenamente el funcionamiento y las capacidades del SEM.

---

### 3.1 Deflexión y control del haz

Para contextualizar los desarrollos con relación en la comprensión de la manipulación de los electrones y con ello en la construcción del SEM, tenemos a J.J. Thomson, quien describe a los electrones como corpúsculos, en comparación con las partículas de la luz que presentan un comportamiento similar, independientemente de la naturaleza de la sustancia de la que se originen, estableciendo que su masa es mucho más pequeña que la de cualquier átomo conocido, además de proponer que son los constituyentes esenciales de todos los átomos (Thomson, 1907). Estas consideraciones permiten establecer que estos corpúsculos pueden organizarse en un estado de equilibrio, aunque estas entidades están cargadas negativamente y podrían repelerse entre sí, las fuerzas que los mantienen unidos tienden a mantenerlos cohesionados.

De esta forma, la teoría corpuscular de la materia, según la definición de Thomson (1907), postula que el átomo está compuesto por electricidad negativa y positiva, donde la entidad negativa consiste en partículas extremadamente finas llamadas corpúsculos. Estos corpúsculos se caracterizan por tener el mismo tamaño y la misma cantidad de electricidad, los cuales fueron detectados por primera vez en un tubo<sup>9</sup> a través del cual se hacía pasar una descarga eléctrica, produciendo un verde fosforescente brillante. Thomson en 1897 inicio su estudio con este experimento al realizar una pequeña modificación al experimento original de Sir William Crookes en 1875, colocando una cruz de malta hecha de mineral de mica dentro del tubo y observando que la descarga ya no producía una extensión del verde fosforescente al final del tubo, sino una sombra

---

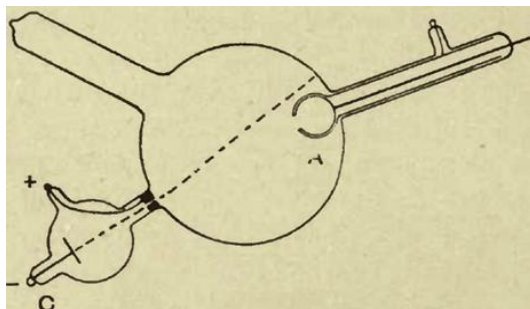
<sup>9</sup> El tubo al que se hace referencia posteriormente es denominado en los experimentos de Thomson, tubo de rayos catódicos.

bien definida de la cruz. Sin embargo, su interés sobre este experimento no fue dado por la primera vez en que se analizó este fenómeno por Plücker en 1858, fueron las elaboraciones conceptuales de los hallazgos de Röntgen en 1885 alrededor de los rayos X los que captaron su atención dadas las aplicaciones que este dejó entrever para el estudio de la materia, buscando diseñar su propio método experimental para estudiar el comportamiento observado de estos rayos, que hasta entonces eran desconocidos, de esta manera mediante una serie de experimentos, demostró que había subestimado la importancia de estos rayos y revela que sus implicaciones eran más amplias y complejas de lo que se pensaba.

Estos experimentos que generan una explicación de los rayos, son caracterizados a partir de las siguientes tres propiedades, la primera, su desvío magnético, confirmando su carga y respaldada con las ideas provenientes experimentales de Hertz en 1886 de que estos rayos eran, de hecho, electrones; en la segunda, logra determinar la velocidad de los corpúsculos, reconociendo que esta era mil veces más rápida que la de otras partículas, como las moléculas de hidrógeno; y en la tercera, establece una relación carga-masa a partir de la deflexión del haz, evidenciado al someter el rayo a un campo magnético en ángulos rectos a este, así como por un cuerpo electrificado, figura 8. En su experimento, al ajustar los campos magnéticos y eléctricos para equilibrar la desviación y lograr que el haz de rayos pasará horizontalmente, le permitió calcular matemáticamente la relación carga-masa de los electrones (Falconer, 1987).

Figura 8.

*Tubo de rayos catódicos*



*Nota.* La figura representa la desviación de un haz en un tubo de rayos catódicos. *Tomado de Thomson (1907).*

Siguiendo la línea de los experimentos de Thomson, otros científicos como J. Perrin en 1895 aportaron más evidencia sobre el comportamiento de estas entidades. Perrin demostró que, al capturar corpúsculos en un cilindro metálico, electroscopio, adquiere una carga eléctrica negativa. Si los corpúsculos no atravesaban el orificio del cilindro, el electroscopio no recibía carga. Thomson hizo una conexión audaz entre este experimento de Perrin y sus propios experimentos al exponer un gas dentro de un tubo de rayos catódicos, demostrando que el gas se volvía conductor de electricidad y, por tanto, interactuaba bajo la influencia de un campo electromagnético.

A partir de estos experimentos, surgieron dos puntos de vista sobre el comportamiento de los rayos, el primero describe a los rayos como entidades negativamente electrificadas disparadas por un cátodo a gran velocidad, mientras que el segundo sugiere que los rayos son un tipo de vibraciones etéreas u ondas. Esta caracterización es usada y perfeccionada en el SEM, pero se requiere un análisis más profundo para ello, de hecho, si se remonta al análisis y a la modificación que Thomson hizo sobre el experimento de Wehnelt, quien calentando cal al rojo, obtuvo emisiones de grandes cantidades de rayos catódicos cargados negativamente, en su lugar, Thomson

---

usa cal en una pieza de platino y, al aplicar un potencial de 100 V, logró generar un haz de rayos, cuyo trayecto era visible por la luminosidad producida al pasar a través del gas en el tubo (Thomson, 1907).

Esta experiencia de modificación de potencial en distintos tipos de elementos es característica del SEM donde de manera análoga un filamento se eleva a altas temperaturas, lo que proporciona suficiente energía a los electrones para superar la fuerza que los mantiene en el material, este calentamiento genera una gran cantidad de electrones que son liberados al vacío del tubo, conocido como el efecto termoiónico, similar al proceso observado por Wehnelt, el cual al ser considerado y teniendo en cuenta el análisis de Thomson, se puede emplear para conocer el constructo teórico del SEM, estableciendo una relación directa con las interpretaciones aquí hechas sobre la trayectoria de los electrones y su enfoque en la muestra, donde una vez más se puede garantizar que la historia de las ciencias no son en sí una acumulación de hechos, sino que su análisis logra que un investigador conozca las bases teóricas y las implicaciones directas que esta puede desarrollar para la configuración de conceptos científicos.

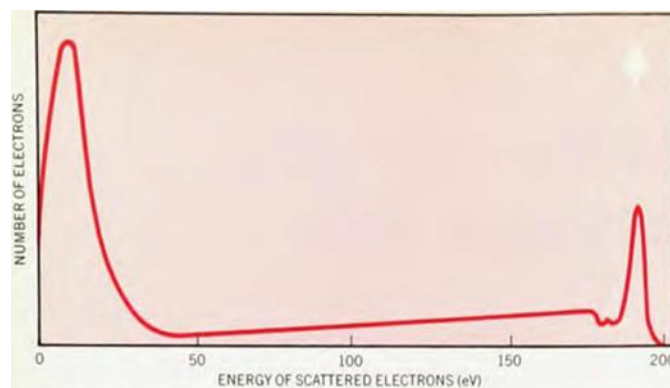
Como una argumentación final a esta serie de experimentos se culmina, en parte, con la observación de la difracción de electrones, un fenómeno que hasta ese momento solo se había observado en fotones, proporcionando evidencia del comportamiento ondulatorio de los electrones y permitiendo una comprensión de estos como entidades fundamentales para el desarrollo de la física cuántica. Ahora bien, cuando hablamos de la longitud de onda de la luz, todavía no se consideraba que otras entidades también pudieran mostrar un comportamiento ondulatorio. Este fenómeno se explicaría más adelante con la introducción matemática de De Broglie y los experimentos de Davisson-Germer, que ampliarían la comprensión de la dualidad onda-partícula.

### 3.2 Interacción con la materia

El patrón de interferencia caracterizado por la luz, donde se observan franjas oscuras y brillantes, solo puede interpretarse desde una mirada ondulatoria, lo que introduce elementos conceptuales sobre la dualidad de los fotones, de manera análoga, cuando se hace incidir un haz de electrones en una red cristalina se genera nuevamente un patrón de difracción semejante al observado con la luz, demostrando que los electrones también exhiben un comportamiento ondulatorio. Este experimento contribuye a la idea de dualidad, no obstante, otros procesos de interacción de electrones con la materia, como los estudiados por C. Davisson en 1913, junto con los desarrollos matemáticos de L. De Broglie en 1920, enriquecen esta comprensión, como se desarrollan a continuación.

#### Figura 9.

*Pico de dispersión elástica de algunos electrones*



*Nota.* La imagen muestra el pico de número de electrones en energías específicas. Tomado de Gehrenbeck (1978).

Davisson mientras trabajaba para la *American Telephone and Telegraph Company* (AT&T) en EE.UU., se embarcó en un camino inesperado, al obtener resultados insignificantes durante su trabajo con cátodos de níquel recubiertos de óxido como sustitutos de los cátodos de platino, redirige su investigación hacia las propiedades de la emisión de SE en celdas y placas

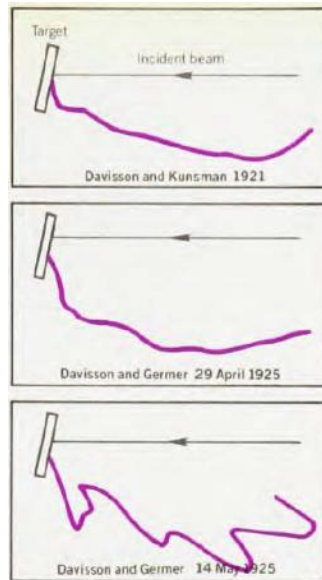
sometidas al bombardeo de electrones (Gehrenbeck, 1978), inicialmente toma una lectura de la dispersión de los SE de alrededor de un 1%, prácticamente de forma elástica, figura 9. Para validar esta observación, junto con L. Germer en 1924 modifican el experimento inicial desarrollado con C. Kunsman en 1921, empleando diferentes metales como blanco e incluso mejorando el vacío del instrumento usado para su análisis, determinando que las curvas de distribución de la dispersión de níquel parecían explicarse razonablemente bajo la hipótesis de que una pequeña fracción de los electrones de bombardeo realmente penetraba en una o más de las capas de electrones que se supone constituyen la estructura externa del átomo de níquel.

La modificación del experimento inicial fue dado bajo varias consideraciones, una de ellas ocurrió durante un periodo de tiempo en el que el equipo estuvo en desuso y la columna sufrió un daño irreversible, sin embargo, tras la reparación de la columna y retomando sus experimentos, los resultados obtenidos fueron iguales a los de 1921, pero se hacen más visibles los picos dado que lograron aumentar el vacío en el tubo, figura 10, otro hallazgo obtenido por Davisson se dio durante un viaje a Inglaterra en el verano de 1924 cuando conoce que su investigación publicada en 1921 fue tomada por De Broglie en 1923 como prueba del comportamiento ondulatorio del electrón, y la última que valida la anterior consideración fue el hecho de que en el periodo en que estuvo en desuso la columna, al cortar y abrir el tubo, la forma policristalina del objetivo de níquel había cambiado debido al calentamiento extremo, formando alrededor de diez caras de cristales en el área donde el haz de electrones incidente era dispersado (Gehrenbeck, 1978). Interpretaciones que a la luz de lo propuesto por De Broglie, permiten establecer que los picos de la figura 10, particularmente en el año de 1925, fueron el producto del intenso trabajo técnico por mejorar un vacío para acentuar los picos y comprender que este comportamiento era únicamente dado por un

fenómeno de interferencia constructivo y destructivo, fortaleciendo la idea de que los electrones también poseían un comportamiento ondulatorio.

**Figura 10.**

*Picos de interferencia de una lámina de Níquel*



*Nota.* La primera gráfica describe los resultados de Davisson y Kunsman en 1921, la del medio muestra los resultados de Davisson y Germer en 1925 y la última muestra una serie de picos producto de haber mejorado el vacío en la columna por Davisson y Germer también en 1925. *Tomado de Gehrenbeck (1978).*

Estas interpretaciones, aplicadas al SEM, permitieron comprender que para obtener señales precisas en la formación de imágenes era necesario optimizar el vacío, evitando así sesgos en las señales emitidas por el equipo que no provienen directamente de la muestra. Adicionalmente, los cambios observados en la estructura de la lámina de níquel evidencian la necesidad de una preparación adecuada de las muestras, ya que la alta irradiación puede dañarlas, este análisis repercutió indirectamente en la disposición del equipo electrónico construido por Ruska y Knoll, quienes lograron obtener las primeras imágenes con electrones, estableciendo una relación entre la configuración de la bobina y el haz primario de electrones.

Se puede decir entonces que la relación entre la estructura cristalina del material y la dispersión de electrones observada en el SEM es una continuación directa de las observaciones experimentales que realizaron Davisson y Germer, donde el patrón de dispersión está determinado por la disposición de los átomos en la muestra.

---

**Capítulo 4. De la Historia a la Práctica****4.1 La Historia y la Filosofía de las Ciencias en la Educación**

Este trabajo de investigación apuesta por la construcción de un conocimiento con enfoque histórico, basado en los procesos subyacentes que vinculan la formación de imágenes en microscopía electrónica. Dichos procesos se desarrollan en el marco de reconstrucciones fenomenológicas, relacionadas con las ideas previas en la formación de imágenes empleando instrumentos que han sido elaborados para conectar aspectos que, al ser problematizados, permiten comprender el funcionamiento de un SEM y la producción o formación de sus microfotografías.

La enseñanza de la historia de las ciencias puede dar la impresión de que se está perdiendo el tiempo y de que el aprendizaje se convierte en un bucle, ya que no se está enseñando concretamente un concepto, una ley o una teoría. Bajo esta premisa en este trabajo de investigación se articulan los procesos históricos reconstruidos como una herramienta para enseñar ciencias, el cual aunque añade un grado de dificultad debido al uso de palabras obsoletas o a la asignación de significados diferentes a términos empleados en la actualidad, complicaría la construcción del conocimiento, cuyos significados han estado en constante evolución e interpretación, pero que pueden ser esenciales para generar consciencia sobre cómo se ha construido la ciencia, si bien este proceso puede volverse más complejo, las relaciones entre los conocimientos previos y los nuevos conceptos, facilitadas por el uso de fragmentos históricos, experiencias prácticas, análisis de fenómenos y construcción de instrumentos, pueden resultar más significativas que la enseñanza de las ciencias como se ha hecho tradicionalmente.

Por otra parte, se ha considerado históricamente que una de las premisas más aceptadas en ciencias es que los resultados producidos por teorías y leyes son difícilmente refutables, a menos que existan suficientes pruebas para cambiar de paradigma. Esto suele llevar a la conclusión de

que su construcción es lineal y que solo hay una única manera de interpretarlas y por tanto de enseñarlas. Sin embargo, en un contexto educativo donde abunda la diversidad de aprendizajes, es fundamental enseñar con propuestas innovadoras que eviten el dogmatismo, abriendo el camino hacia la construcción del conocimiento desde enfoques no necesariamente tradicionales. Como señalan Höttecke, Henke y Riess (2010), consideramos la ciencia “en proceso” no como un proceso lineal, caracterizado por la falsa dicotomía de éxito o fracaso, sino como un esfuerzo marcado por sus desvíos y errores, equilibrado por soluciones creativas y una naturaleza autocrítica.

En el desarrollo de esta investigación, se prioriza la discusión del proceso y progreso científico en sí, en lugar de centrar la tesis principal en la presentación de hechos y fenómenos, demostrando así alternativas elaboradas a partir de la constante evolución del conocimiento humano. En línea con lo mencionado, se busca el planteamiento de una propuesta educativa que involucre a estudiantes de pregrado, al relacionar el conocimiento científico histórico con el moderno. Sin embargo, este enfoque de enseñanza, tal como se presenta, aún no se ha resuelto, como lo expresan Höttecke, Henke y Riess (2010).

Por tanto, un componente histórico, como propuesta para abordar temas en ciencias y como parte de un currículo en ciencias, constituye, en primer lugar, según estos mismos autores, que la ciencia podría considerarse como un esfuerzo humano y social que incluye perspectivas sobre las motivaciones de los científicos, los conflictos, controversias y caminos sin salida. Esto, a su vez, podría dirigir hacia una construcción del conocimiento que fomente la confiabilidad, credibilidad y creatividad en el establecimiento de nuevo conocimiento. En segundo lugar, al no considerarse que los desarrollos históricos conduzcan de manera lineal a nuestra comprensión actual, se cuestiona desde este enfoque qué conocimiento podría ser simplemente verdadero o superior (y,

---

desde la perspectiva de los estudiantes, generalmente se considerará así la visión moderna) (Höttecke, Henke y Riess, 2010).

Aunque actualmente existen varias perspectivas en torno a la enseñanza de conceptos, colocando la mayoría de las veces al estudiante en el centro de estas discusiones, estas no pueden lograrse cuando los docentes no tienen una formación adecuada en este campo y, por lo tanto, no han desarrollado las habilidades necesarias para articular de manera didáctica, dirigida y estructurada la relación entre los procesos históricos y el estado actual de la ciencia. Esto conduce a que los profesores a menudo carecen de las habilidades adecuadas para enseñar una multiplicidad de conceptos científicos en lugar de una única verdad (Höttecke, Henke y Riess, 2010).

Los estudios histórico crítico se consideran en esta investigación como una perspectiva pedagógica para la enseñanza en la cual los docentes utilizan la narración cronológica de los descubrimientos científicos y la evolución de las ideas científicas con el fin de lograr que la argumentación de los estudiantes sobre los aspectos conceptuales de la ciencia, sus procesos y contextos sean más elaborados, (Wang y Marsh, 2002 como se cita en Kortam et al., 2020). Sin embargo, para desarrollar plenamente esta idea, es crucial priorizar la formación docente en física y visibilizar su importancia, de modo que se constituya como un pilar fundamental que contribuya a la educación y, al mismo tiempo, mejore la efectividad en la enseñanza de conceptos científicos, incrementando el interés de los estudiantes por la ciencia y, por tanto, su motivación en el aula.

Para lograr esto, se propone integrar el constructo teórico sobre formación de imágenes en la microscopía con los procesos de enseñanza, utilizando el SEM como un instrumento científico que involucra conceptos derivados de las experimentaciones de diversos científicos, como Thomson, Hertz y Davisson-Germer. Esta articulación se aborda a través del análisis de acontecimientos relacionados con la evolución y construcción de la microscopía óptica y

---

electrónica, así como el estudio del comportamiento dual de electrones. Estos elementos permiten facilitar la comprensión de conceptos complejos y, con ello, impulsar la construcción de elaboraciones epistemológicas propias, basadas en una comprensión más profunda del contenido científico.

Por lo tanto, la historia y, en su defecto, la filosofía de la ciencia se presenta como estrategias efectivas para el aprendizaje científico (Höttecke, Henke y Riess, 2010), logrando este proceso a través de la formación docente, en este caso, mediante el conocimiento encapsulado en el SEM. Comprender la historia y la filosofía de la ciencia de manera desvinculada de la práctica, y por ende de la tecnología, resulta poco útil si no se establece un vínculo con la concreción de los saberes mediante el uso de instrumentos. Así, caracterizar al SEM como un instrumento científico desde una visión histórica ha sido imprescindible en esta investigación, ya que, desde el principio, se constituye como el objeto de estudio que, a través de la formación de imágenes, ha guiado las diversas discusiones aquí presentadas y, con ello, el análisis del comportamiento de los electrones.

#### **4.2 El papel de los instrumentos en ciencias y en la educación en ciencias**

Según Kuhn (1970), en tiempos de revolución científica, cuando la tradición de la ciencia normal<sup>10</sup> cambia, el científico debe reeducar su percepción del entorno, en algunas situaciones familiares, debe aprender a interpretar una nueva forma (Gestalt), lo que gradualmente provoca la desaparición de las escuelas más antiguas, en parte debido a la conversión de sus miembros al

---

<sup>10</sup> Kuhn define la ciencia normal como el trabajo científico que se desarrolla dentro de un marco de paradigma dominante, el cual se mantiene estable mientras resuelve problemas en función de las normas establecidas por dicho paradigma. Durante este período, los científicos no buscan cambiar el paradigma, sino profundizar en su comprensión y resolver las anomalías que surjan dentro de él. El adiestramiento previo y las herramientas conceptuales proporcionadas por el paradigma guían el trabajo de los científicos, quienes operan con un conjunto compartido de supuestos y métodos (León y Pérez, 2005).

---

nuevo paradigma. La transformación y el cambio de paradigma son el resultado de diversos factores, como procesos experimentales, observaciones, descripciones, modelaciones matemáticas o el uso de instrumentos, cada uno desempeñando un papel crucial. De esta manera, el límite que separa los instrumentos de las ciencias no está claramente definido; de hecho, se podría considerar que ocupan, por antonomasia, una posición social similar a la del conocimiento científico. Sin embargo, aunque esta afirmación puede parecer insuficiente por sí sola, resulta enriquecedor reconocer el papel fundamental de los instrumentos en la construcción del conocimiento.

De esta manera, la historia de la física como ciencia y, por extensión, la de la cultura moderna, puede entenderse como la crónica del desarrollo y uso de instrumentos. A partir de ello, nos encontramos inmersos en lo que Davis Baird denomina una tecnosfera<sup>11</sup>. No obstante, esta idea difiere de la noción tradicional que sostiene que la ciencia se trata únicamente de descubrir verdades fundamentales. Como menciona el propio Baird, la historia de la física es, en gran medida, la historia de los instrumentos y su uso inteligente, perspectiva que se emplea en esta investigación al considerar al SEM como un producto del conocimiento humano.

Sin embargo, para considerar al SEM como un instrumento que, en esencia, ha potenciado la investigación en ciencias exactas y aplicadas, su uso puede analizarse desde cuatro aristas principales.

Las dos primeras están relacionadas con la función del instrumento en las ciencias e ingeniería. La primera, según Baird, consiste en producir conocimiento, mientras que la segunda

---

<sup>11</sup> Baird denomina a la tecnosfera como el mundo humano, diferente al de los animales no humanos, que está poblado por objetos creados por el hombre, lo que convierte este entorno en un diseño de su propia creación. Esto contrasta, por ejemplo, con las herramientas que un pájaro utiliza para construir un nido o un castor para edificar una presa. De este modo, Baird concluye que, si los humanos perdiéramos nuestra tecnosfera y nuestras habilidades para crear objetos, estaríamos en una posición similar a la de estos animales (Baird, 2004).

lo concibe como un producto al servicio de la humanidad, permitiendo que ese conocimiento genere más conocimiento. No obstante, este proceso ha enfrentado históricamente diversos problemas. Los instrumentos científicos no aparecen de manera automática ni son adaptaciones de procesos que ocurren al azar. A menudo se pasa por alto la reflexión sobre los fundamentos teóricos que los sustentan, así como los problemas que surgen en su desarrollo y evolución. En muchos casos, los científicos y técnicos se limitan a aprender a manejar los instrumentos, sin involucrarse en las teorías que los hacen posibles o los cuestionamientos que podrían haber llevado a su creación y que pueden resultar también como una muestra del desarrollo humano.

Este fenómeno se ha registrado en distintos momentos históricos, por ejemplo, la relación entre energía y trabajo y su evolución en el campo de las máquinas de vapor y motores no se consolidó sin dificultades, y lo mismo ocurrió con la contribución de Joseph Black, Laplace, Lavoisier e incluso Newton en la cuantificación del calor. Ellos no solo diseñaron instrumentos, sino que reflexionaron profundamente sobre las teorías detrás de fenómenos como el calor latente o el calor específico, desarrollando instrumentos que pudieran validar o soportar sus contribuciones teóricas.

El análisis funcional de estos instrumentos revela cómo, en muchos casos, han dejado de ser simples herramientas técnicas para convertirse en agentes de cambio dentro de una cultura (Fleming, 1974).

Según Fleming (1974), los instrumentos o artefactos no son solo objetos funcionales, sino que contienen evidencias que permiten interpretar hechos históricos, como el nivel tecnológico, los materiales disponibles, las preferencias estéticas y las relaciones sociales de una cultura. Estas interpretaciones no son fijas, sino que dependen de los intereses ideológicos, sociales y culturales de quienes los estudian. Bajo esta premisa, al analizar los procesos experimentales de Davisson y

---

Germer, se observa que sus intereses, guiados principalmente por consideraciones económicas, los llevaron a un camino que culminó en las bases de la física cuántica. De esta manera, el SEM no está en absoluto desvinculado de los aspectos culturales que caracterizaron el desarrollo científico de esa época, sin embargo, estas consideraciones, al igual que ocurre con otros instrumentos, suelen pasar a un segundo plano, dando mayor importancia a la técnica que a la estructura epistemológica detrás del instrumento.

A menudo se desconoce o invalida la historia al relegarla en favor de un conocimiento moderno que no contempla lo pasado como relevante. Esta visión errónea de las ciencias sugiere que el conocimiento contemporáneo eclipsa el anterior, aislando la historia de la ciencia a textos especializados y llevando a un desconocimiento de los antecedentes de los descubrimientos científicos. De hecho, Baird en 2004 describe cómo la historia muestra que algunos de los fenómenos empíricos producidos por instrumentos, independientemente de su interpretación inicial, proporcionaron las bases empíricas necesarias para la especulación teórica fundamental, como los movimientos que Faraday produjo en la construcción de su motor, demostrando que no necesitamos una gran cantidad de teoría o de hecho ninguna para aprender algo de la construcción y demostración de los instrumentos, es decir, que aprendemos interactuando con sus partes, incluso cuando nuestras palabras para describir cómo funcionan esas partes son insuficientes.

En relación con este trabajo el experimento de Davisson-Germer, cuya interpretación inicial no alcanzaba a comprender el comportamiento del electrón, y mucho menos que sentaría las bases para la invención del microscopio electrónico por Ruska, una vez se enteró Davisson de que Louis de Broglie había confirmado la naturaleza ondulatoria de los electrones a partir de sus resultados, junto con Germer reorientaron su investigación para comprender mejor su propio experimento. A partir de ese momento, sus esfuerzos no solo contribuyeron al desarrollo teórico

de las ciencias, sino también al avance experimental, al perfeccionar un equipo que, en su tiempo, enfrentaba dificultades técnicas, como la necesidad de alcanzar un alto vacío, un desafío que contrastaba con la tecnología disponible en esa época. Este ejemplo, aunque contrasta con lo propuesto por Baird, funciona en la medida en que permite explicar un experimento a partir de una teoría, algo similar ocurrió con el experimento de Faraday, que, aunque inicialmente incomprendido, pueden desempeñar un papel notable en el desarrollo de nuevas tecnologías y teorías científicas.

Desconocer la historia de las ciencias y de los instrumentos, así como su influencia en la sociedad, equivale a ignorar los pilares que fundamentan las ciencias tal como las conocemos hoy en día. Esta visión, que reduce la ciencia a meros contenidos enciclopédicos, omite que los aciertos y desaciertos históricos, junto con las diversas interpretaciones, pueden ser más significativos para la enseñanza de las ciencias que la ciencia moderna en sí. Al pasar por alto la edificación del conocimiento actual y priorizar aspectos técnicos y materialistas, se pierde una parte crucial de la comprensión científica.

La tercera arista que involucra el uso de los instrumentos está relacionada con la semántica, cuya interrelación con la epistemología constituye un eje articulador en la comprensión de los procesos de generación, interpretación y validación de significados dentro del marco del conocimiento. La epistemología, se conecta estrechamente con la semántica, que analiza cómo las palabras y oraciones representan el mundo y las ideas. Esta relación enriquece ambos campos y es fundamental para entender cómo los seres humanos construyen y validan el conocimiento.

De este modo, el SEM se emplea como un instrumento que facilita interpretaciones relacionadas con su propia explicación, reflejando el papel que desempeña la semántica en el discurso que lo rodea. La definición y comprensión de los términos utilizados en las proposiciones

---

científicas influyen directamente en la evaluación de su veracidad. Variaciones en el significado de estos términos pueden alterar profundamente su interpretación epistemológica, estableciendo la necesidad de emplear conceptos precisos en la construcción del conocimiento.

En áreas como la formación de imágenes y el estudio de la interacción de fotones y electrones con la materia, la precisión en las definiciones es necesaria, ya que las diferencias entre el MO y el SEM, aunque comparten ciertos objetivos, resultan clave en esta investigación para abordar estos aspectos. Si bien ambos permiten la creación de imágenes, los fotones y electrones presentan longitudes de onda diferentes y, aunque sus comportamientos son similares en ciertos aspectos, también poseen particularidades. Por ejemplo, ambos generan un patrón de interferencia que refleja su comportamiento ondulatorio; sin embargo, los fotones lo producen a partir del experimento de la doble rendija, mientras que los electrones lo hacen mediante un patrón de difracción al pasar por una red cristalina, presentando como principal diferencia el tamaño de la rendija. Esto establece procesos de formación de imágenes que están intrínsecamente ligados a los principios fundamentales de estas entidades.

De esta manera se muestra cómo las explicaciones particulares de cada instrumento son necesarias para mejorar las proyecciones y el análisis de las imágenes. Aunque el símil con la microscopía óptica puede facilitar su interpretación, las particularidades del SEM requieren especial atención, ya que su funcionamiento no se limita solo a la obtención de imágenes, sino que está profundamente vinculado a un marco teórico que involucra conceptos de la física clásica y moderna, como la naturaleza cuántica de las partículas, su comportamiento dual onda-partícula y su interacción con la materia.

Por último, la cuarta arista está relacionada con el conocimiento inherente al instrumento, un conocimiento oculto que, desde una perspectiva epistemológica, resulta fundamental. Este

---

conocimiento va más allá de la mera operatividad del instrumento y se convierte en una pieza clave en la investigación científica, especialmente cuando las aplicaciones prácticas de dicho conocimiento comienzan a consolidarse. A medida que el conocimiento avanza, sus aplicaciones se convierten en insumos esenciales para el progreso social, lo que demuestra cómo el contexto histórico, político, económico y social influye en la transición de la teoría a la práctica, o viceversa. En este proceso, la carga teórica se orienta hacia la explicación de fenómenos específicos. A este tipo de conocimiento, que se encuentra integrado en el diseño, funcionamiento del instrumento junto con sus explicaciones y aplicaciones, se le denomina "conocimiento encapsulado".

Este conocimiento combina dos formas principales, el teórico y el práctico. El conocimiento teórico, o conocimiento de modelos, incluye las representaciones materiales de los posibles resultados de medición. Por ejemplo, la escala de una regla representa físicamente las unidades de medida para cuantificar una longitud, y este tipo de conocimiento está profundamente integrado en el diseño y funcionamiento del instrumento. Por otro lado, el conocimiento práctico se refiere a la capacidad de producir resultados consistentes y confiables bajo determinadas condiciones. Un termómetro, por ejemplo, debe mostrar la misma lectura cuando se expone a la misma temperatura. Este conocimiento práctico es esencial para que los instrumentos de medición operen correctamente y sean útiles en aplicaciones reales (Baird, 2004).

De este modo, los instrumentos se presentan como híbridos que integran tanto el conocimiento teórico como el práctico. No solo representan modelos teóricos, sino que también encapsulan el saber práctico necesario para operar de manera confiable. En el caso del SEM, además de generar imágenes, su tecnología y diseño permiten obtener datos adicionales que van más allá de lo visual, incluyendo información composicional, topográfica y morfológica. Esto enriquece el análisis científico y facilita una interpretación más detallada de los objetos estudiados.

---

Sin embargo, el análisis de estos datos requiere, por un lado, de una teoría que permita comprender los resultados obtenidos y, por otro, de una práctica sólida que garantice que la información suministrada sea trazable y confiable. Por ello, es común afirmar que los instrumentos extraen información de una muestra; sin embargo, es la interpretación de esta información, dependiente del entrenamiento del observador, la que permite ver y analizar los resultados (Sydenham et al., 1979 como se cita en Baird, 2004).

No obstante, es más preciso decir que un instrumento que interactúa con la muestra genera una señal que, al ser transformada adecuadamente, puede interpretarse a partir de la información teórica disponible tanto del instrumento como de la muestra. Este proceso involucra tanto el análisis de fenómenos a través de la interacción con la muestra como la conversión de estos en información útil para el observador.

Algo similar ocurre en el SEM, donde las imágenes son el resultado de las señales captadas por los detectores, que se transforman en datos electrónicos mediante algoritmos. Esto es posible gracias a las lentes electromagnéticas, que permiten controlar el haz de electrones, producto de la investigación en electrostática y magnetostática, fundamentos para generar diferentes energías en electrones que chocan con la muestra y producen imágenes de diversas resoluciones. Así, el SEM, respaldado por su solidez científica y tecnológica, se ha consolidado como una herramienta confiable y consistente, contribuyendo a una nueva comprensión de los procesos involucrados en la formación de imágenes a partir del comportamiento dual del electrón.

De este modo, es posible articular un discurso más elaborado que sitúa a los instrumentos en un plano de igualdad con las contribuciones teóricas más relevantes en la comprensión del mundo (Baird, 2004), considerándolos como referentes que facilitan la comprensión de las leyes y teorías que rigen su funcionamiento, además de desempeñar un papel activo en el conocimiento

---

y la práctica científica. Los instrumentos, por tanto, pueden orientar el pensamiento y la acción, así como ayudar en la demostración de las leyes de la naturaleza y la visualización de fenómenos. Esto permite entender el concepto de instrumento de manera más amplia, considerando sus diversas funciones y aplicaciones técnicas (Leal, 2020).

Al considerar el SEM como un insumo para conocer la naturaleza, es fundamental entender que el conocimiento no se limita a un ejercicio mental. Conocer implica pensar y expresar esos pensamientos en palabras. Las creaciones no verbales, que van desde diagramas hasta artefactos e instrumentos, también poseen un valor significativo. Estas herramientas pragmáticas contribuyen a la interpretación de teorías y al proceso de construcción del conocimiento (Baird, 2004).

En esta investigación, se busca desarrollar estos procesos desde diferentes perspectivas, estableciendo relaciones directas e indirectas en su creación. Se propone que la investigación histórica, como recurso para favorecer la construcción del conocimiento, es válida y puede generar una alternativa de enseñanza innovadora en relación con los principios de la física moderna, particularmente en lo que respecta al comportamiento de electrones, considerando también el papel de los fotones como referente para su interpretación. En este sentido, justamente por las consideraciones acá presentadas es que el SEM se constituyó desde el principio como un eje vertebral para el desarrollo de esta investigación.

### **4.3 Análisis del SEM como instrumento científico**

La reconstrucción histórica del SEM como un instrumento científico ilustra claramente la capacidad humana para crear herramientas que fortalecen el conocimiento científico a través de sus aplicaciones. Esto demuestra que no basta con el conocimiento teórico plasmado en los libros; la habilidad de construir y materializar ese conocimiento es esencial. En palabras de Feynman "Lo que no puedo crear, no lo puedo entender" (Baird, 2004, p. 113), y este mérito recae en la

---

ingeniería, que, al incorporar la tecnología como su aliada, ha hecho que los instrumentos científicos sean cada vez más accesibles. Así, el SEM consolidado como un logro de enorme relevancia, siendo una antesala de los avances desarrollados en la física cuántica, cuyos fundamentos, ya descritos en el capítulo 2, detallan entre otros que la función de cada una de sus partes, sus características y el modo en que se integran para formar imágenes con un nivel de resolución que puede lograrse debido a la corta longitud de onda de los electrones es posible gracias a un logro de la ciencia, la técnica, el rigor y la perseverancia científica.

El SEM, entonces, no solo es un instrumento complejo en su construcción, sino también en los aspectos más intrincados de su funcionamiento. La formación de imágenes en el SEM podría parecer casi mágica, especialmente si se considera el contexto histórico de su invención. Los pioneros en la manipulación de electrones no solo enfrentaron desafíos teóricos, sino que en gran medida debían resolver dificultades técnicas. A pesar de estos obstáculos, su construcción se basó en la teoría del magnetismo para desarrollar su tesis sobre la concentración magnética del haz de electrones en lentes divergentes. La persistencia en documentar y comparar los efectos observados con fotones en la microscopía óptica fue clave para su éxito, lo que finalmente condujo a la construcción del primer microscopio electrónico, el TEM.

De este modo, al reconocer e identificar los diversos aspectos involucrados en el uso de instrumentos, como los mencionados en esta sección, es evidente que no todos los criterios empleados en la construcción del SEM se hacen explícitos durante su manipulación. No obstante, la presencia implícita de estos elementos es lo que le otorga al análisis histórico un aspecto novedoso dentro de esta investigación. Aunque un instrumento de tal complejidad no es fácilmente accesible, existen teorías y fenómenos relacionados que permiten explicar su funcionamiento interno. Entre ellos destacan los rayos catódicos, el electromagnetismo, la difracción de electrones

---

e incluso principios ópticos presentes en el MO, que actúan como un análogo del comportamiento del SEM. Presentarle estos elementos al lector, ofrece una visión más completa del SEM, no solo como una herramienta técnica, sino también como un medio para ilustrar y sustentar teorías modernas, particularmente en lo referente a la formación de imágenes, siendo prometedor el campo que establece Baird en relación con el conocimiento encapsulado de los instrumentos.

El conocimiento encapsulado en el SEM, que en parte responde a lo estipulado por Abbe sobre la resolución de imágenes en los MO, ha perdurado a lo largo de generaciones, sin embargo, este desafío ha sido superado mediante el uso de electrones, logrando una mayor resolución incluso frente a las dificultades impuestas por la aberración.

En este sentido, el nacimiento de la microscopía electrónica fue revolucionaria, ya que permitió romper con esa barrera inherente a la luz visible. Al utilizar electrones, cuya longitud de onda es mucho más corta, el SEM logra alcanzar niveles de resolución imposibles para los microscopios ópticos, por tanto, el SEM no solo amplía la capacidad de observación a nivel microscópico, sino que actúa como un intermediario entre el ámbito teórico y el empírico. Su diseño y funcionamiento permiten visualizar estructuras que estaban más allá de las limitaciones de la óptica tradicional y ofrecen una plataforma para validar hipótesis sobre el comportamiento de los electrones y otros fenómenos subatómicos. Esto evidencia que el SEM es más que un simple medio técnico; es un recurso que facilita la conexión entre la física moderna y la realidad observable.

Además, el SEM desempeña un papel significativo en el ámbito educativo y científico. Las imágenes que produce no son meras representaciones, sino que conllevan implicaciones teóricas que invitan a reconsiderar las bases del conocimiento. De este modo, el SEM no se limita a ser un instrumento más de laboratorio, se convierte en un elemento activo en los procesos de enseñanza

---

y en la comprensión de fenómenos complejos. Su presencia en la física moderna refleja la interdependencia entre los instrumentos científicos y las teorías que intentan describir el comportamiento del mundo natural.

#### **4.4 Relaciones experimentales para la construcción del conocimiento**

Al reconocer la influencia de la actividad experimental en el contexto del SEM y los desarrollos que ha generado, se puede entender este proceso como un motor que impulsa el desarrollo de habilidades que trascienden las expectativas individuales, otorgando una connotación profunda a la evolución del conocimiento. Esto demuestra la complejidad de la relación entre teoría y experimento, ya que, como indican Malagón, Ayala y Sandoval (2011), la caracterización del experimento en su vínculo con la teoría no puede reducirse a una simple dicotomía entre ser fuente o medio de validación, de hecho, históricamente, el experimento se ha considerado un proceso que permite entender cómo se comporta la naturaleza bajo condiciones que no se presentan espontáneamente, lo que ha consolidado teorías ligadas tanto a la observación como a la experiencia sensible y estas, a su vez, han proporcionado instrumentos que, como el SEM, son capaces de abordar fenómenos tan complejos como el comportamiento cuántico de la materia.

De allí que repensar la práctica pedagógica a la luz de la actividad experimental y proponer alternativas para la enseñanza de las ciencias permita explorar y evaluar dinámicas que van más allá de los métodos contemporáneos, como las clases invertidas o la gamificación, los cuales a veces se alejan del proceso real de construcción del conocimiento. Este conocimiento se descubre de manera autónoma a través del ensayo y error, la experimentación, la caracterización, el análisis y la explicación de fenómenos, así como la redefinición del uso de instrumentos científicos.

El conocimiento encapsulado en estos instrumentos traza una ruta de investigación compleja, al comprender y analizar su funcionamiento, como también al adquirir un significado

---

más amplio y contextualizado que refleje e integre coherentemente la práctica científica. Este conocimiento se puede volver tangible cuando se presenta como una concreción de la teoría en que se basa, utilizando el experimento como un puente articulador que facilita esta conexión.

De este modo, al observar las diferentes dimensiones que la actividad experimental puede abarcar, se reconoce que su legado no se restringe únicamente a la validación o apoyo de teorías científicas. Como indica (Guijarro, 2001 como se cita en Malagón, Ayala y Sandoval, 2011), el experimento tiene posibilidades más amplias, como detectar el efecto de propiedades, visualizar fenómenos inaccesibles y resaltar las peculiaridades de los mismos. En esta investigación, estas dimensiones se exploran a través del SEM, un instrumento científico cuyas complejas estructuras epistemológicas resultan incomprensibles si solo se limita a su manipulación técnica, dejando al instrumento la tarea de proyectar una imagen. Por tanto, disponer de herramientas análogas permitiría acceder a descripciones profundas sobre la formación de imágenes, ya que, de otro modo, ni siquiera los experimentos mentales lograrían vislumbrar completamente las relaciones conceptuales que estos fenómenos implican.

De esta forma, es necesario cambiar la visión convencional del conocimiento científico, que ha tendido a separar claramente la teoría del experimento, haciendo al sujeto partícipe de su propio conocimiento a partir de interrogar su entorno y no ubicar al docente como el centro del conocimiento. Al reconsiderar el papel de la experimentación en las clases de ciencias, se busca mejorar la enseñanza, destacando que la forma en que los docentes interactúan con el contenido que enseñan tiene un impacto significativo en el proceso de aprendizaje. Así, al integrar el uso de instrumentos científicos como el SEM en la enseñanza, no solo se potencia la comprensión teórica, sino también el desarrollo de habilidades prácticas y analíticas en los estudiantes.

---

Basándose en estos aspectos sobre la naturaleza de las ciencias desde un enfoque sociocultural, surgen dos elementos clave para diseñar la propuesta didáctica. En primer lugar, los análisis históricos y epistemológicos indican que los fenómenos científicos no surgen de manera espontánea, sino que son construcciones resultantes de la interacción entre la intervención humana, a través de instrumentos, y las respuestas de lo que denominamos naturaleza, de tal manera que examinar el carácter histórico y cultural de la realidad natural permite reconocer la necesidad de estudiar los instrumentos y procesos involucrados en la formación de imágenes. Estos instrumentos, por tanto, no deben ser considerados como canales de comunicación entre nuestras ideas y la naturaleza, sino como las condiciones que hacen posibles los fenómenos científicos. En segundo lugar, se considera el análisis del tipo de reflexión que la actividad experimental puede aportar a la enseñanza de las ciencias, considerando su contribución a la comprensión del campo fenoménico en el que se inscribe una ley o concepto, así como la relación con construcciones y organizaciones “teóricas” previas, y el reconocimiento de las organizaciones conceptuales vinculadas a la experiencia sensible (Malagón, Ayala y Sandoval, 2011).

A partir de estas ideas sobre la historia, la experimentación, el sujeto y la construcción del conocimiento—temas que han sido entrelazados a lo largo de esta investigación, con el SEM como eje central—se plantea una propuesta de enseñanza fundamentada en la interpretación del SEM y la formación de imágenes. Para ello, se utilizará la experimentación como un apoyo que permita analizar la resolución de imágenes y la difracción de electrones, estableciendo relaciones y puntos de convergencia en torno a la dualidad onda-partícula. Esta propuesta se complementará con la incorporación de fragmentos históricos y preguntas orientadoras que fomenten cuestionamientos sobre el comportamiento de los electrones en su interacción con la materia y el funcionamiento del equipo. De este modo, se pretende facilitar intervenciones pedagógicas que aborden aspectos de

---

la física moderna que suelen ser difíciles de comprender, a menudo considerados como contenidos complejos en los libros de texto o presentados de manera excesivamente matemática.

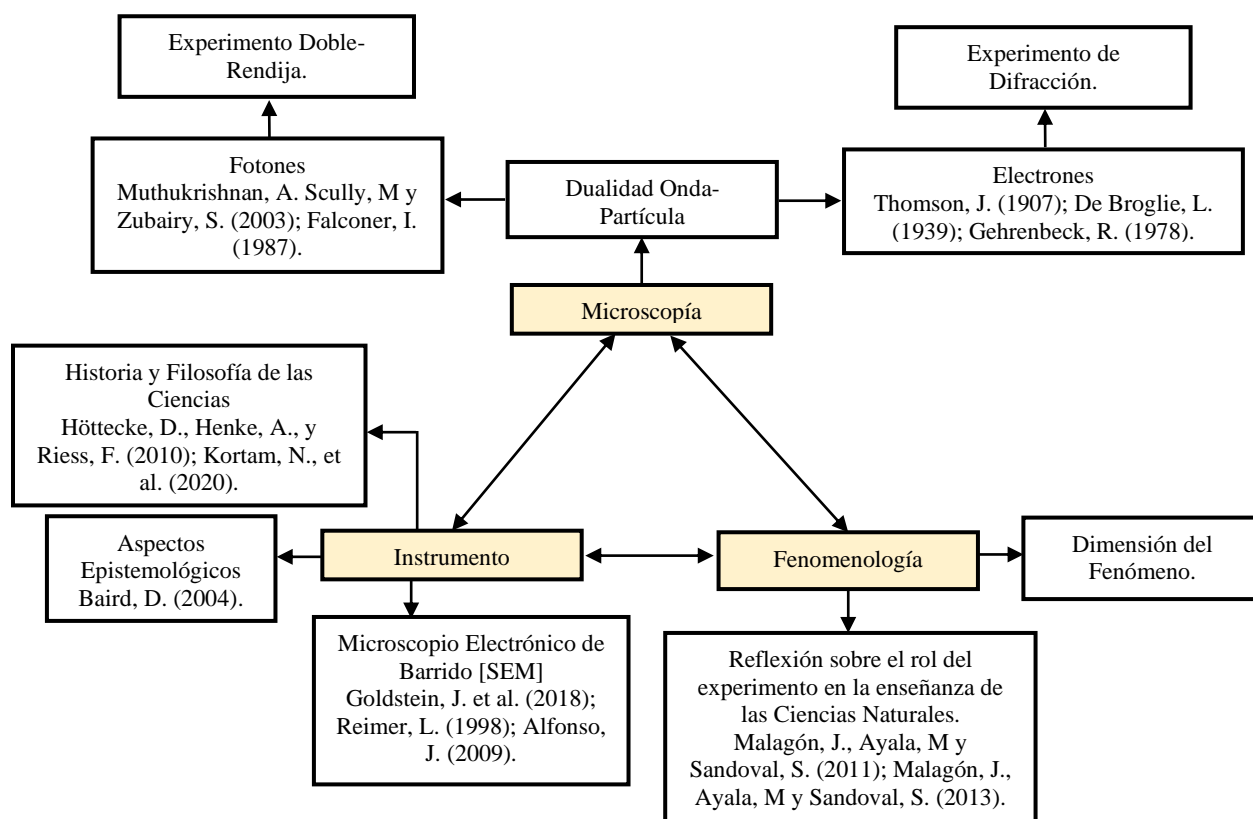
#### **4.5 Enseñanza del comportamiento dual de electrones en imágenes SEM**

Las proyecciones que surgen del uso de la historia en la enseñanza de las ciencias evidencian la importancia de formar tanto a docentes como a estudiantes en el manejo adecuado de la información. Si bien la historia de las ciencias podría percibirse como una recopilación de datos obsoletos y los instrumentos científicos podrían reducirse a su operatividad frente a problemas cotidianos, al conectar ambos elementos se puede enseñar con una mirada más crítica. Esto, además de fomentar la innovación en el aula, genera nuevas alternativas de enseñanza para los docentes. Así, se enriquece el conocimiento cuando se trascienden los aspectos puramente operativos, permitiendo un enfoque crítico ante los fenómenos, alejándose de la enseñanza tradicional que se centra únicamente en la teoría y su comprobación experimental.

Conforme a lo dicho, se propone un enfoque que vincule tres ejes investigativos, figura 11, y se estructure una ruta educativa en la que el estudiante construya su propia explicación sobre la formación de imágenes en un SEM. Este proceso no solo le permitirá establecer relaciones, sino también desarrollar interpretaciones basadas en teorías y fragmentos de textos históricos que refuercen su comprensión del tema. Así, la propuesta educativa conecta elementos históricos tanto teóricos como experimentales, integrando experiencias que relacionan la formación de imágenes con la comprensión del instrumento. De esta manera, se refuerzan los vínculos entre el desarrollo teórico, experimental y epistemológico.

Figura 11.

Ejes investigativos



Nota. Ejes investigativos entre la historia y la práctica. Elaboración propia.

#### 4.5.1. Metodología

De acuerdo con lo expuesto anteriormente, este trabajo de investigación se centra en los ejes propuestos de la figura 11. En este sentido, se considera la experiencia del sujeto marcado por posiciones éticas y políticas como un elemento para comprender y contextualizar el aprendizaje, por lo que esta investigación se orienta hacia una perspectiva que valora la complejidad de la experiencia humana, interpretando cómo las diversas interacciones y contextos pueden influir en la comprensión de los fenómenos y en la construcción del conocimiento. Un proceso similar sucede con el conocimiento, donde conocer el contexto mediante el cual se consolida un principio,

---

una ley o, en este caso, un instrumento, favorece la comprensión de los conceptos científicos involucrados en su uso.

Por tanto, esta investigación, fundamentada en el uso de un instrumento científico, inicia con el empleo de preguntas orientadoras y continúa con un experimento y un fragmento histórico como medios para generar cuestionamientos dirigidos a la indagación en torno al comportamiento de los electrones y su relación con la formación de imágenes. Asimismo, como mencionan Rodríguez, Gil y García (1996), el carácter de la investigación surge de las concepciones y necesidades concretas del conocimiento que se busca construir, lo que implica que la selección de las cuestiones a tratar no sigue una línea teórica rígida, sino que se origina a partir de experiencias que se entrelazan y consolidan en el uso del objeto de estudio, el SEM.

En este sentido, los elementos histórico-filosóficos presentados tanto en la investigación como en esta propuesta sobre el trabajo experimental en torno al SEM se emplean para explorar cómo las experiencias pasadas pueden enriquecer la enseñanza de las ciencias, lo que permite concederle a la historia de las ciencias el lugar que merece como medio para construir y consolidar conocimiento. Así, tal como menciona Mohajan (2018), no podemos ignorar las experiencias del pasado en el desarrollo presente y futuro; por ello, la investigación histórica se basa en la identificación, análisis e interpretación de textos del siglo XIX y XX, cuyo fin es comprender e interpretar dicho conocimiento en otros contextos. Por tanto, en la propuesta se seleccionan fragmentos de fuentes primarias, complementados con fuentes secundarias, con el objetivo de destacar hechos relevantes para el análisis en el que las discusiones puedan aportar al establecimiento de puntos de convergencia al reconocer que, en ocasiones, los seres humanos llegan a análisis parecidos independientemente del contexto y la época.

---

Dadas las particularidades de este trabajo, se recurrió a los textos originales de Freundlich de 1963 para presentar las discusiones en torno a la resolución del MO y del SEM y su relación con la resolución de imágenes. Asimismo, para comprender la estructuración del comportamiento de los electrones en relación con la formación de imágenes, se consultó el texto del Nobel Ruska de 1987 sobre las dificultades que presentó al construir las lentes electromagnéticas; a su vez, este ejercicio se conecta con diferentes experimentos que permitan al estudiante ir construyendo su propia idea sobre el comportamiento de los electrones, mientras se relaciona con aspectos vinculados a los principios de la física moderna.

#### **4.5.2. Diseño de la propuesta**

Una de las dificultades en la enseñanza de las ciencias radica en la necesidad de seguir un currículo que impone el uso de interpretaciones concretas para la enseñanza de teorías de la física clásica y moderna. Esta rigidez conduce a omitir información y a las interpretaciones que mantuvieron a muchos científicos firmes en su búsqueda de explicaciones. Por tanto, realizar un análisis exhaustivo durante la introducción de una nueva teoría, sin considerar el contexto y las dificultades de su época, puede facilitar la comprensión del estudiante, pero también puede inducir una percepción errónea sobre el proceso de creación científica. Esta simplificación puede llevar a la idea de que hacer ciencia es una tarea sencilla o un simple juego (Torres, 2018). Aunque quizás este enfoque responda a las exigencias curriculares nacionales e internacionales, cabe señalar que no garantiza una buena educación, ya que incurre en el error de considerar la ciencia desde una perspectiva positivista, memorística y, por tanto, tradicional. Esta aproximación deja de lado la producción de discursos y el saber construido, soslayando así el proceso que puede generar avances en el desarrollo del conocimiento a partir de la crítica, el interés por los aspectos naturales y una apreciación de las ciencias contextualizada, no supeditada a los libros de texto. Además, se ignoran

---

enfoques que promuevan la indagación, la experimentación y el pensamiento crítico, aspectos que son esenciales para una comprensión profunda y significativa de los fenómenos científicos.

Considerando el fenómeno de la formación de imágenes, la propuesta de enseñanza centrada en el SEM como instrumento científico se conforma por tres aspectos, figura 12, estos aspectos se desarrollan en tres sesiones.

En la sesión 1, se analizan aspectos de orden teórico a medida que se establecen las diferencias en las imágenes debido a la magnificación y mejora de la resolución, utilizando una lupa y un binocular; esto esclarece la incidencia de la dioptría y su función en el detalle de la imagen observada, al tener en cuenta la modificación de múltiples variables, al tiempo que busca dirigir las explicaciones hacia el comportamiento intrínseco de los fotones y electrones, cuyo eje articulador resulta ser su longitud de onda.

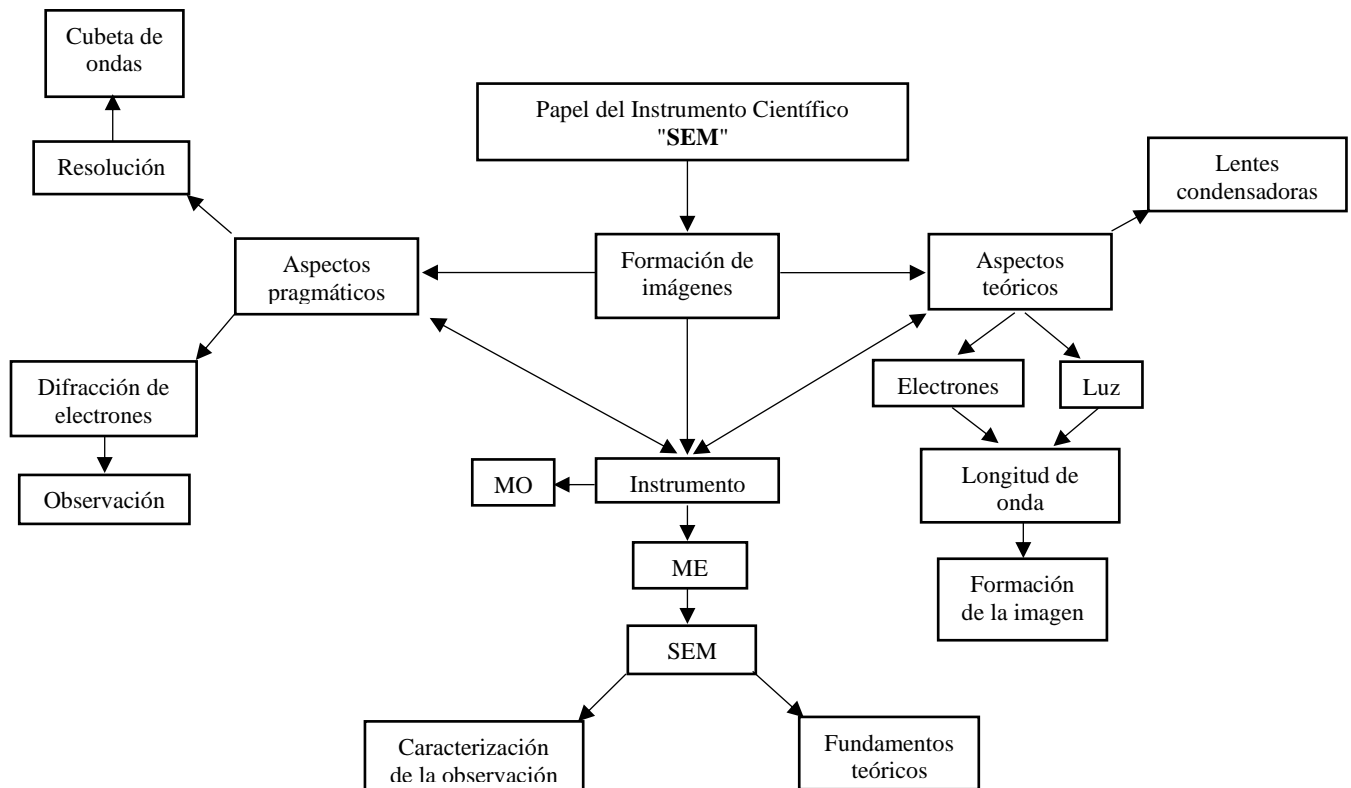
En la sesión 2, se ponen en juego los elementos propios de la luz estableciendo su relación con la longitud de onda y qué implicaciones tiene esto con lo que se ve, adicionalmente se propone un ejercicio en el que se busca presentar las distintas trayectorias tanto de electrones como fotones pensados como ondas y partículas con el uso de una plantilla del MO y del SEM con el fin de establecer comparaciones dentro del funcionamiento de estos instrumentos.

En la última sesión, los aspectos pragmáticos ofrecen una interpretación del fenómeno de formación de imágenes a partir de experimentos como la distancia de dos pulsos en una cubeta respecto a la resolución de una imagen y la difracción de electrones al interactuar con la materia, buscando con esto hacer un símil entre las ondas mecánicas de las ondas electromagnéticas a fin de ejemplificar el límite de resolución de una manera más tangible, posteriormente, considerando estos elementos, se realiza dos experimentos en los que se obtienen los patrones de interferencia característicos, uno de fotones, mediante un láser y una rejilla de difracción, y otro de electrones,

usando un tubo de rayos catódicos con un cristal de difracción con el objetivo de identificar las similitudes entre estos patrones y los obtenidos en la experiencia de la cubeta de ondas, reflexionando sobre las ideas ondulatorias.

Figura 12.

Triangulación en torno al instrumento científico (SEM)



Nota. Desarrollo de la propuesta educativa. Elaboración propia.

Como cierre general de la propuesta se proponen dos fragmentos históricos que permiten consolidar las relaciones epistémicas entre la longitud de onda, resolución y formación de imágenes y los problemas que surgieron en el contexto del SEM, de manera que el estudiante se constituya en un agente activo en su proceso de aprendizaje.

La estructura se organiza de la siguiente manera:

Tabla 1.

*Organización por sesiones de las actividades*

SESIONES	OBJETIVO	ACTIVIDADES
<b>SESIÓN 1: (2 horas - 40 min)</b> Sobre la idea de magnificación. ¿Qué es la magnificación?	Introducir el concepto de magnificación mediante el uso de lupas y binoculares, relacionándolo con la dioptría y la resolución de imágenes.	<b>Actividad 1 y 2 Magnificación:</b> Los estudiantes usarán lupas y binoculares para comparar cómo cambia la percepción de las imágenes a partir de un patrón de líneas según el nivel de aumento y la distancia, realizando mediciones y cálculos sobre la magnificación. <b>Actividad 3 Dioptría:</b> Se presenta el concepto de dioptría, descrita como una propiedad que afecta la forma en que se ven los objetos, lo que les permitirá establecer la relación entre aumento y distancia para enfocar la imagen
<b>SESIÓN 2: (1 hora - 40 min)</b> Sobre la construcción de la imagen ¿Cómo es posible formar imágenes con fotones y con electrones?	Explicar la formación de imágenes bajo diferentes condiciones, comenzando con la fuente de energía a partir del cambio de longitud de onda y, posteriormente, analizar las propiedades de los fotones y electrones en el MO y en el SEM.	<b>Actividad 1 Relación color de emisión-formación de imagen:</b> En esta actividad se muestra cómo las diferentes longitudes de onda de la luz permiten ver diferentes elementos dentro de una misma imagen. <b>Actividad 2 Trayectorias de los fotones y electrones:</b> Se presentan la idea de onda y de partícula asociadas a los fotones y electrones para pensar su trayectoria en un MO y en un SEM.
<b>SESIÓN 3: (2 horas - 40 min)</b> Longitud de onda y resolución en el MO y el ME	Analizar cómo la imagen generada por un SEM supera las limitaciones impuestas por la longitud de onda de la luz, destacando las discusiones en torno al comportamiento dual de los electrones.	<b>Actividad 1 Límite de Resolución con una Cubeta de Ondas:</b> En esta actividad se presenta una analogía del límite de resolución con ayuda de una cubeta de ondas. <b>Actividad 2 Partículas que se comportan como ondas:</b> Aquí se muestran los patrones de difracción para los fotones y electrones, considerando la idea de

---

comportamiento ondulatorio en la formación de imágenes.

**Actividad 3 un análisis histórico:** En esta actividad, a modo de conclusión, se presentan dos fragmentos históricos para discutir las ideas de longitud de onda, resolución y formación de imágenes.

---

*Nota.* Representa el objetivo de cada sesión con un resumen de las actividades propuesta en la propuesta de aula. Elaboración propia.

Cada uno de estos aspectos reúne diferentes comprensiones que van desde las interpretaciones sobre la formación de imágenes empleando instrumentos accesibles, como una lupa, hasta aquellas generadas por equipos tecnológicamente avanzados, como el SEM. Así, se busca integrar todos los elementos expuestos en la figura 12 con el fin de acercar al estudiante a interpretar y consolidar un conocimiento científico contextualizado, promoviendo la construcción de un discurso que facilite la explicación del fenómeno.

Para concluir, los recursos utilizados y las explicaciones en cada sesión se presentan de manera que sean de fácil adquisición, lo que garantiza el logro del objetivo general planteado en esta investigación. Sin embargo, esta intervención, a modo de propuesta, está sujeta a modificaciones, teniendo en cuenta las particularidades de cada contexto. Al reconocer que las experiencias de los estudiantes son insumos valiosos para iniciar esta serie de actividades, estas pueden requerir adaptaciones. Así, el reconocimiento de las experiencias previas por parte del docente resulta necesario para ajustar la intervención a las necesidades específicas del grupo, ya sea profundizando en el discurso o promoviendo una introspección guiada por preguntas orientadoras más superficiales. Esta serie de actividades busca fortalecer un currículo que, a menudo, considera los instrumentos científicos únicamente como medios para medir o cuantificar algún proceso o experimento.

---

### 4.5.3. Propuesta de Aula

#### Sesión 1: Sobre la idea de magnificación. ¿Qué es la magnificación?

Explicación sobre el concepto de la magnificación, para comprender la idea de aumentos y lograr relacionarla con lo que hace la disposición de lentes y las fuentes en un microscopio óptico y en un microscopio electrónico de barrido.

#### **Materiales:**

- Lupa
- Binoculares (Opcional)
- Hoja rayada de papel
- Hoja en blanco
- Regla

**Discusión:** ¿Qué significa 10x en cada microscopio?

#### **Actividad 1: Magnificación 1**

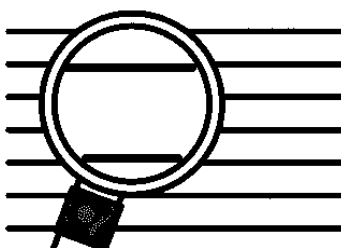
Para comenzar, se coloca una hoja de papel rayado sobre una superficie plana. El primer paso es observar las líneas de la hoja sin utilizar la lupa. Usando una regla, se miden cuántas líneas o espacios entre las líneas caben en 1.0 cm. Esta medida inicial servirá como referencia para comparar lo que se observará a 20 cm con lo que se ve a través de la lupa. Anotando el número de líneas que caben en ese espacio, a fin de establecer un patrón de aumento, numérico, que dependa de la distancia.

Una vez que se registre la medición a 20 cm, ahora se procede a usar la lupa. Los estudiantes tomarán una lupa estableciendo una distancia para observar las mismas líneas de la hoja de papel rayado, como se muestra en la figura 13, pero ahora a una distancia de 2.0 cm contando la cantidad de líneas que caben en el nuevo espacio. Asegurándose de enfocar las líneas

con la finalidad de que se observen claras y definidas. Con la lupa en posición, los estudiantes deben volver a contar cuántas líneas pueden ver dentro del mismo cm que midieron previamente anotando este nuevo valor, que deberá ser diferente, ya que la lupa habrá ampliado la imagen de las líneas.

**Figura 13.**

*Lupa con patrón de aumento*



*Nota.* La figura presenta el ejemplo de aumento en una lupa en comparación con el patrón de líneas de 3X.

La relación establecida entre estas distancias y número de líneas permite comprender que si, por ejemplo, se observan 20 líneas en 20 cm y en la segunda de 2.0 cm solo se pueden ver 2 líneas en ese mismo espacio, dado que es de 20 a 2 se magnifica 10 veces es decir 10x. Esto significa que la imagen que se ve a través de la lupa es diez veces más grande (10x). Buscando que los estudiantes entiendan de manera práctica cómo se mide el aumento en una lente y cómo afecta la percepción visual de los objetos.

Esta actividad se puede complementar presentando una hoja con líneas punteadas para observar cómo cambia la percepción de estas a diferentes distancias, con y sin el uso de una lupa. La primera parte consiste en colocar la hoja sobre una superficie plana para observar las líneas punteadas directamente, sin utilizar la lupa, las líneas punteadas parecerán continuas, como si formaran una sola línea sólida, para después utilizar la lupa sobre esa misma hoja, enfocado las líneas punteadas notando que las líneas, que antes parecían continuas, ahora se ven claramente como una serie de líneas separadas.

**Actividad 2 (opcional): Magnificación 2**

Para iniciar esta actividad, se introduce el concepto de aumento aplicado ahora a los binoculares, explicando que, al igual que con una lupa, se puede medir cuánto más grande aparece un objeto observado a través de los binoculares en comparación con verlo a simple vista. Se utilizará un muro de cualquier patrón repetitivo que esté a una distancia determinada, como una pared con ladrillos o ventanas, para facilitar la comparación visual, haciendo una analogía con el patrón de líneas.

Ahora bien, cada estudiante puede elegir un punto de referencia que contenga un patrón visible de repetición, o crear este patrón en un cartel similar al rayado. Primero observarán directamente el muro o el patrón y después mirarán a través de los binoculares. El objetivo es comparar cuántas filas de ladrillos o cualquier otro patrón repetitivo se ven sin los binoculares y cuántas se ven a través de los binoculares, calculando el aumento del instrumento, de la misma manera que cuando se usó la lupa.

**Preguntas sobre la actividad:**

Una vez completada la actividad, los estudiantes reflexionan sobre la experiencia y comparan su percepción del aumento en los binoculares con la lupa utilizada previamente guiados por las siguientes preguntas:

- ¿Qué características de las líneas o del patrón observado aparecen, que no son observados a simple vista?
- ¿Qué características de las líneas o del patrón observado se pueden identificar que no son evidentes a simple vista?

- 
- Si una lupa amplía las líneas, ¿qué crees que sucedería si utilizas una lente con mayor aumento?  
¿La cantidad de líneas visibles seguiría disminuyendo?
  - ¿El aumento de la lupa mejora siempre la claridad de lo que ves? ¿Qué otros factores, además del aumento, influyen en la calidad de la imagen?
  - ¿Cuál crees que es el papel de la iluminación en el plano para que las líneas puedan ser observadas adecuadamente?

### **Discusión de cierre:**

Haga una explicación completa de qué está entendiendo por magnificación y cómo influye en el estudio de la formación de imágenes con diferentes instrumentos.

### **Actividad 3: Dioptría**

Para finalizar la primera sesión sobre la idea de magnificación, es interesante mostrar a los estudiantes cómo se logra establecer la medida de este aumento y como las propiedades ópticas de las lentes como la dioptría afecta la forma en que se ven los objetos, si se sabe que la dioptría es una medida en la óptica que describe el poder de una lente y está relacionada con la distancia focal de la lente, siendo esta la distancia a la cual la lupa debería ubicarse para ver las líneas de la hoja, quiere decir que a mayor dioptría, menor será la distancia focal y mayor será la capacidad de la lente para acercar objetos. Las lupas y lentes con mayor número de dioptrías tienen un mayor poder de aumento, lo que significa que los objetos se verán más grandes a través de ellas, es decir, que la magnificación que observaron con la lupa está relacionada con el número de dioptrías de esa lente. De esta forma, teniendo en cuenta la ecuación básica de la dioptría mostrada a continuación:

$$D = \frac{1}{f}$$

---

Donde  $D$  es la dioptría de la lente,  $f$  es la distancia focal de la lente medida en metros, se puede determinar la dioptría de las lentes que han usado. Por ejemplo, si cuando se enfocó la imagen de la línea se requirió una distancia de 33 cm, significa que la lupa tiene una dioptría de 3.

**Preguntas sobre la actividad:**

- ¿Qué crees que pasaría si usaras una lupa con mayor número de dioptrías? ¿La distancia a la que necesitas sostenerla cambiaría? ¿Cómo afectaría eso al aumento?
- ¿Puedes explicar por qué una lupa con más dioptrías tiene un mayor aumento y se enfoca a una distancia menor? ¿Cómo lo relacionas con lo que observaste al usar tu lupa?
- Si sostienes la lupa más cerca o más lejos de la hoja, ¿cómo cambia lo que observas? ¿Qué distancia parece ser la mejor para ver las líneas más claras y definidas?
- Si observas las mismas líneas con un microscopio óptico y un microscopio electrónico, ¿esperarías ver más detalles en uno que en otro? ¿Por qué?

**Trabajo de cierre:**

Realiza tres dibujos del mismo objeto y establece los siguientes elementos, la distancia focal, el número de dioptrías y las diferencias que se presentan en la resolución de la imagen debido a la magnificación.

**Transición entre actividades:**

Para llevar un hilo conductor sobre cada actividad de la propuesta educativa, reflexiona sobre la idea de magnificación y de dioptrías presentada en la actividad de la lupa y de los binoculares.

---

**Reflexión final:**

Después de calcular el aumento de la lupa, se puede observar cómo la magnificación de los objetos se logra mediante lentes simples. Sin embargo, se ha mostrado que las lupas tienen un límite en la cantidad de detalles que pueden mostrar, debido a que en diferentes distancias entre la lupa y la hoja rayada se perdía la claridad de la imagen de la línea, así pues, a medida que los objetos que queremos observar se hacen más pequeños, necesitamos herramientas más sofisticadas, como los microscopios ópticos y los microscopios electrónicos de barrido, para ver más detalles, sin la pérdida de calidad de la imagen. Ambos microscopios utilizan principios físicos diferentes para lograr mayores aumentos y resolver detalles más pequeños.

**Pregunta de transición:**

Hasta el momento se ha usado luz visible con lupas y binoculares para ampliar una imagen. Pero ¿Qué pasaría si usa otro tipo de fuente, como un haz de electrones para hacer las mismas observaciones? ¿Cómo cambiarían los detalles observados? ¿Cómo cambia la forma en que vemos las cosas cuando usamos un microscopio óptico en comparación con un microscopio electrónico?

**Sesión 2: Sobre la construcción de la imagen ¿Cómo es posible formar imágenes con fotones y con electrones?**

**Discusión:** ¿Creen que podríamos ver electrones directamente con nuestros ojos? Si no es así, ¿por qué creen que sí podemos ver la imagen en un microscopio electrónico?

**Materiales:**

- Una linterna con diferentes filtros de colores para simular diferentes frecuencias de luz.
- Una hoja con dibujos o un patrón visible.

- Pintura fluorescente.
- Cartulina negra o algún material opaco.

### **Actividad 1: Relación color de emisión-formación de imagen**

En esta actividad se les colocará a los estudiantes una lámina de papel con dibujos o patrones geométricos sobre una superficie plana. A continuación, se iluminará la lámina con una linterna equipada con diferentes filtros de colores, rojo, verde y azul, simulando así distintas longitudes de onda de luz dentro del espectro visible. Los estudiantes observan y registran las variaciones en la percepción del color y la intensidad de los dibujos bajo cada condición de iluminación.

Posteriormente, se oscurecerá la habitación y se colocará un material fluorescente o fosforescente cerca de la lámina. Se iluminará nuevamente el material con la linterna, observando y registrando el fenómeno de luminiscencia. Se comparará la intensidad y duración de la emisión bajo las diferentes condiciones de iluminación.

### **Discusión sobre la actividad:**

Analice a partir de un cuadro comparativo lo observado con cada una de las fuentes de luz, escriba qué preguntas y dificultades surgieron según lo observado. Utilice estas preguntas como punto de partida para iniciar su cuadro:

- ¿Pueden ver el dibujo con todos los colores de luz? ¿Qué ocurre con la luz azul, roja o verde?
- ¿Qué ocurre cuando se ilumina el material fluorescente? ¿Cómo cambia su apariencia cuando se ilumina con diferentes colores?

---

**Actividad 2: Trayectoria en el MO y SEM de la luz y electrones**

Luego de observar los diferentes colores asociados a una longitud de onda característica dentro del espectro visible e identificar cómo afectan la percepción de la imagen, y cómo estos cambios se deben a la interacción de la luz con los materiales, parece interesante mostrar cómo viajan los fotones y electrones dentro de un MO y un SEM, a fin de comprender cómo envía información de cualquier muestra obtenida.

**Discusión:** ¿Cuáles son las trayectorias seguidas por los fotones y electrones en un MO y un SEM?

En esta actividad los estudiantes representan en un diagrama cómo los fotones viajan a través de un MO y cómo los electrones lo hacen en el SEM, considerando inicialmente un comportamiento de partícula y posteriormente un comportamiento de onda, relacionando su experiencia con la formación de los colores, el funcionamiento de la lupa y las condiciones requeridas para observar un objeto. Así, a través de las ideas surgidas, se argumenta la formación de la imagen desde las dos miradas.

**Ideas para tener en cuenta**

Antes de comenzar esta actividad es necesario recordar algunos aspectos de estas dos partículas elementales. Tanto los fotones como los electrones son partículas conocidas por su dualidad, es decir que pueden ser pensados como ondas y como partículas, además los fotones se desvían cuando pasan por lentes en un MO, permitiendo que se enfoque la muestra. En contraste, los electrones, que son partículas con carga negativa, en un SEM, son dirigidos y manipulados mediante campos electromagnéticos, lo que permite que se enfoquen en la muestra.

### A. Dibujo de la trayectoria pensando en forma de partícula:

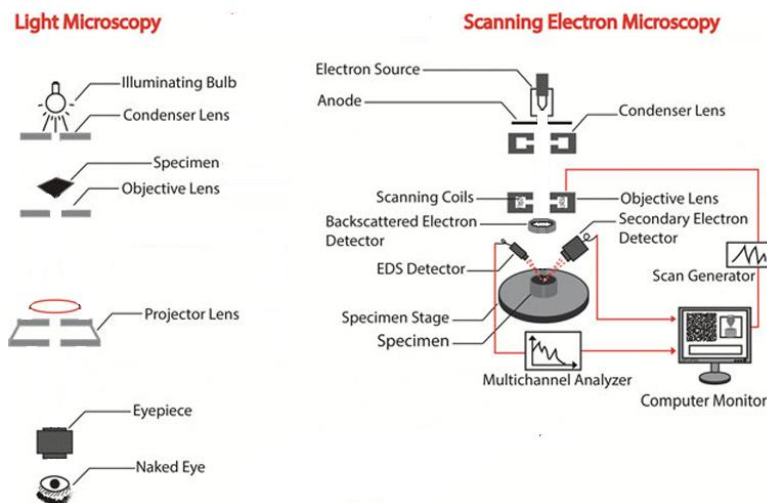
En esta primera parte de la actividad, se comenzará dibujando las trayectorias de los fotones en un MO y de los electrones en un SEM, teniendo en cuenta que ambos se comportan como partículas.

Para el MO, se debe tener presente cómo la luz al pasar por las lentes sufre una desviación hasta llegar a la muestra para formar una imagen aumentada del objeto que se está observando. Los estudiantes deben asegurarse de mostrar claramente cómo es esta desviación.

A continuación, se presenta el diagrama del SEM. En el cual se deberá dibujar la trayectoria de los electrones, también representándolos como partículas, mostrando cómo el haz se ve influenciado por la presencia de los campos magnéticos en las lentes y como se dirige hacia la muestra. En este dibujo, se debe ilustrar cómo al chocar con la superficie de la muestra, se forma la imagen.

**Figura 14.**

*Diagrama MO y SEM para trayectorias corpusculares de fotones y electrones*



*Nota.* La figura presenta los elementos dentro de los microscopios por los cuales pasa el haz de fotones y de electrones con ausencia de la trayectoria del haz. Adaptado de UI-Hamid (2018).

### B. Dibujo de la trayectoria pensando en forma de onda:

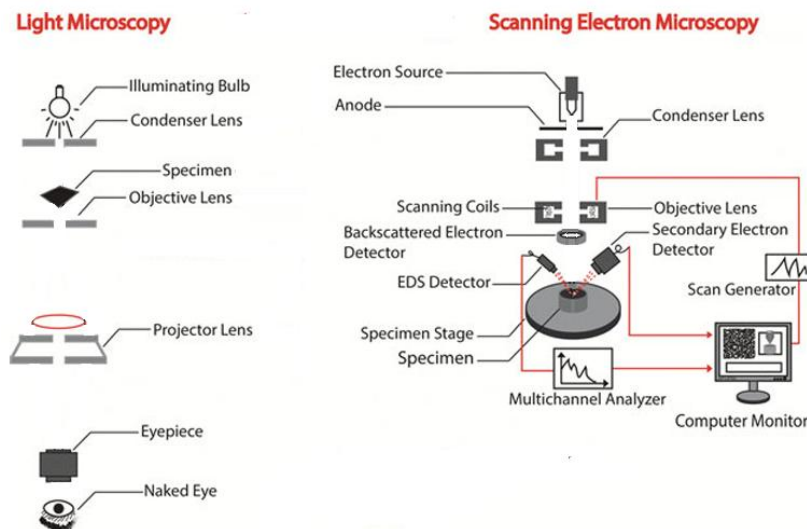
En la segunda parte de esta actividad, se repetirán los dibujos, pero esta vez se pensará en los fotones y electrones como ondas.

Comenzando de nuevo con el MO, si se piensa que los fotones son ondas que se propagan desde la fuente de luz. En el dibujo, se debe pensar nuevamente cómo estas ondas atraviesan las lentes del microscopio y se enfocan sobre el objeto para formar una imagen clara y ampliada. Es importante también mencionar aquellos elementos propios de las ondas como, frente de onda, valle, cresta, frecuencia y longitud de onda en estos diagramas.

Posteriormente se representa el comportamiento de los electrones en el SEM pensando en la visión ondulatoria de los electrones propagados a través del microscopio.

**Figura 15.**

*Diagrama MO y SEM para trayectorias ondulatorias de fotones y electrones*



*Nota.* La figura presenta los elementos dentro de los microscopios por los cuales pasa el haz de fotones y de electrones con ausencia de la trayectoria haz. Adaptado de Ul-Hamid (2018).

---

**Preguntas sobre la actividad:**

- ¿Qué similitudes y diferencias observaste en las trayectorias?
- Al dibujar ambas trayectorias en ambos microscopios, ¿qué dificultades en la explicación de la trayectoria son fundamentales de resolver para comprender cómo se genera una imagen?

**Pregunta de cierre:**

¿Cómo relacionas la formación de imágenes en el microscopio óptico con el hecho que se puedan hacer observaciones directas con el ojo humano, mientras que en el SEM se analizan los registros en una pantalla? ¿A qué atribuirías estas diferencias?

Exponga los resultados de los hallazgos a la clase que considere necesarios de los dibujos elaborados.

**Sesión 3: Longitud de onda y resolución en el MO y el SEM**

Ahora que se ha propuesto la idea de cómo los fotones y electrones se mueven en un MO y un SEM, se pretende profundizar en un aspecto propio de la idea ondulatoria que afecta la capacidad de estos instrumentos en lograr formar la imagen con una resolución específica.

En la actividad anterior, se dibujó cómo los fotones y electrones viajan como partículas y ondas, recordando que cada tipo de partícula tiene una longitud de onda asociada. Por ejemplo, los fotones tienen longitudes de onda que varían de aproximadamente 400 a 700 nm, mientras que los electrones pueden tener longitudes de onda mucho más cortas del orden de  $2.43 \cdot 10^{-12} \text{m}$ , dependiendo de su energía, pero ¿Por qué es posible asociar un fenómeno ondulatorio a estos elementos?

---

**Ideas para tener en cuenta**

A lo largo de la historia de la física hemos podido observar que el fenómeno de difracción está completamente asociado a las propiedades de las ondas, además se ha presenciado tanto en fotones como en electrones, sin embargo, a pesar de que estas ondas no son mecánicas, es posible establecer similitudes con las ondas formadas en una cubeta con agua a partir de pulsos (2 goteros). Esta relación ayuda a ilustrar cómo podemos entender los límites de resolución de un MO y un SEM.

**Materiales:**

- Cubeta de Ondas.
- Dos goteros.

**Discusión:** ¿Cómo crees que podríamos distinguir si dos objetos muy cercanos entre sí son realmente dos objetos separados o solo uno? ¿Qué factores crees que afectarían nuestra capacidad para verlos claramente?

**Actividad 1: Límite de Resolución con una Cubeta de Ondas**

El estudiante colocará los dos goteros a una distancia de 15 cm en la cubeta para poder observar claramente las ondas generadas por cada fuente por separado. Asegurándose de que en ambos goteros estén produciendo ondas a una frecuencia constante, observando cómo las ondas generadas por ambos goteros interactúan entre sí y registrando lo que sucede cuando las ondas se cruzan.

Luego acercará gradualmente los goteros, observando y registrando cómo cambian los patrones de interferencia a medida que las fuentes se acercan. Se concentrará en el punto en que las dos fuentes aún pueden ser reconocidas como separadas, y cuando se vuelven indistinguibles, fusionándose en una sola fuente aparente. Cuando observe que las ondas parecen provenir de un

---

solo punto medirá la distancia mínima a la que los goteros todavía se perciben como dos fuentes separadas.

**Preguntas sobre la actividad:**

- ¿En qué momento dejaste de ver dos fuentes distintas y empezaste a ver una sola? ¿Por qué crees que esto sucede?
- ¿Cómo se relaciona la distancia entre las fuentes y la posibilidad de distinguir las?
- Si al acercar las dos fuentes de ondas comienzan a verse como una sola, ¿qué crees que podríamos cambiar en el experimento para lograr que se vuelvan a ver como dos fuentes separadas?
- ¿Cómo crees que este fenómeno de la cubeta de ondas se relaciona con lo que ocurre en un microscopio?

**Preguntas de cierre:**

Dibuje el patrón de ondas observado, en la distancia inicial de 15 cm, 7 cm y en el punto previo a ser indistinguibles, además, elabore un escrito que involucra las ideas de onda y como esto se puede relacionar con el límite de las imágenes observadas en la experiencia con la lupa, respondiendo a esta pregunta:

¿Por qué llega un punto en el que no pueden distinguir las dos fuentes? ¿Qué relación tiene esto con la longitud de onda y la resolución?

**Actividad 2: Partículas que se comportan como ondas**

En esta actividad los estudiantes seguirán un enfoque experimental presentado en cada tipo de onda mecánica, de fotones y de electrones, generando patrones de interferencia y difracción para hacer comparaciones y establecer analogías entre cada uno de ellos.

**Ideas para tener en cuenta**

Como ya se ha mencionado en otras sesiones existe una similitud entre los fenómenos observados con fotones y electrones, los cuales bajo ciertas configuraciones presentan patrones similares que aportan información a esta idea ondulatoria que se les asocia, tanto así que el físico francés Louis de Broglie se hizo esta pregunta en 1924, cuando aún era estudiante ¿no podrían las partículas mostrar propiedades ondulatorias?

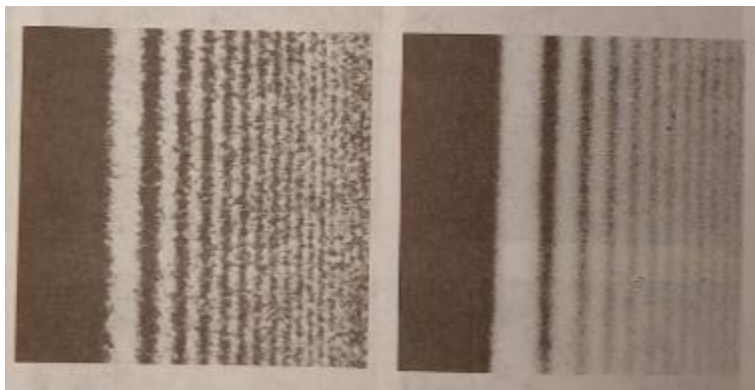
De Broglie sugirió que se podía considerar que toda la materia tiene propiedades ondulatorias. Toda partícula como electrones, protones, átomos, balas e incluso seres humanos tienen asociada una longitud de onda.

La longitud de onda asociada a una partícula de gran masa y velocidad común, como un objeto cotidiano o una molécula grande, es tan extremadamente pequeña que no puede detectarse ni observarse mediante instrumentos convencionales. Pero una partícula diminuta, como un electrón, que se desplaza con gran rapidez, tiene una longitud de onda detectable, la cual es más pequeña que la longitud de onda de la luz visible, pero suficientemente grande para sufrir una difracción apreciable.

Es interesante el hecho de que un haz de electrones se comporta como un haz de luz logrando ser difractado y experimentando interferencia ondulatoria en las mismas condiciones que la luz. Como lo presenta la siguiente imagen:

**Figura 16.**

*Patrón de difracción de fotones y electrones*



*Nota.* La figura presenta el patrón de difracción de electrones a la izquierda y de fotones a la derecha producidos al pasar por una red de difracción. Tomado de Hewitt (2007).

**Materiales**

- Láser.
- Tubo de rayos catódicos

**Primera parte:**

El estudiante iniciará el experimento disponiendo de un láser y una pantalla para la proyección de luz, preferiblemente negra, colocando entre ambos una rejilla con un orificio circular, dirigirá el láser hacia la apertura pequeña, permitiendo que la luz atraviese esta abertura y se proyecte sobre la pantalla ubicada a una distancia determinada. Observará detenidamente el patrón que se forma en la pantalla, identificando el círculo brillante central y los anillos concéntricos, alternadamente oscuros y brillantes.

**Preguntas sobre la actividad:**

- ¿Cómo crees que se relaciona el patrón de difracción de los discos que observaste con los patrones de interferencia en la cubeta de ondas?

- 
- Si cada punto de luz que pasa por una apertura forma un disco, ¿qué sucede cuando muchos puntos cercanos intentan formar una imagen? ¿Cómo afecta esto la capacidad de distinguir detalles pequeños?
  - ¿Cómo podríamos reducir el tamaño de los discos para mejorar la calidad de las imágenes en un microscopio? ¿Qué relación crees que tiene esto con la longitud de onda que usamos para formar la imagen?

**Segunda Parte:**

El estudiante comenzará familiarizándose con el tubo de rayos catódicos y su funcionamiento en la generación del haz de electrones. Luego introducirá la una rejilla de difracción o un cristal delgado en la trayectoria del haz de electrones observando directamente el comportamiento del haz y su proyección en la pantalla fluorescente, identificando cómo el haz de electrones se dispersa al pasar por la rejilla o cristal formando un patrón característico, análogo al de la Luz.

**Preguntas sobre la actividad:**

- ¿Cómo crees que el principio de la difracción de electrones que observamos en el tubo de rayos catódicos se utiliza en la formación de imágenes en un SEM?
- ¿Cómo afecta el cambio en la velocidad de los electrones mediante el ajuste del voltaje a la longitud de onda y, en consecuencia, al patrón de difracción?

**Preguntas de cierre:**

- ¿Cómo se relaciona el patrón de difracción que observaste en el tubo de rayos catódicos con los patrones de interferencia que hemos visto con luz y ondas mecánicas?
- ¿Qué sucede con el patrón de difracción cuando ajustamos el voltaje en el tubo? ¿Qué relación tiene esto con la longitud de onda de los electrones?

- ¿Qué crees que sucedería si los electrones tuvieran una longitud de onda mayor? ¿Cómo afectaría esto la resolución en un SEM?

### **Actividad 3: un análisis histórico**

Después de reflexionar sobre la actividad y su relación con la microscopía óptica y electrónica, es importante mencionar los avances científicos que llevaron a la comprensión de este límite. Por lo que en esta actividad los estudiantes discutirán las implicaciones y contribuciones que tuvo en el desarrollo de la microscopía electrónica a partir de dos fragmentos.

#### **Fragmento I:**

*“En 1878, Ernst Abbe demostró que la resolución del microscopio óptico está limitada por la longitud de onda de la luz. Esto significaba que, incluso cuando se utilizan ópticas de inmersión y luz ultravioleta, el detalle más pequeño que se puede resolver ópticamente es del orden de 100 millimicrones, o 10 ángstroms. No se concibieron medios para resolver detalles más finos hasta que se hicieron dos descubrimientos: (I) las propiedades ondulatorias del electrón en movimiento, postuladas por de Broglie, en términos teóricos, en 1924 y verificadas por Davisson y Germer y por Thomson y Reid en 1927; y (II) el descubrimiento por Busch en 1926-1927 de la analogía entre el efecto de una bobina magnética—la bobina de enfoque utilizada desde 1899—sobre un haz de electrones y el efecto de una lente convexa sobre un haz de luz. Dado que la longitud de onda del electrón en movimiento es mucho menor que la longitud de onda más corta de la luz, estos descubrimientos hicieron concebible que objetos extremadamente pequeños pudieran ser fotografiados con un haz de electrones y lentes electrónicas” (Freundlich, 1963, p. 186).*

#### **Preguntas sobre el fragmento:**

- ¿Qué significa que la resolución está limitada por la longitud de onda de la fuente?
- ¿Cómo afecta esto a lo que podemos ver con un MO o con un SEM?

- ¿Cómo se relaciona la idea de la longitud de onda y la resolución con la separación de las fuentes en la cubeta de ondas según el fragmento?
- ¿Qué cambios en las condiciones podrían haber permitido ver las dos fuentes claramente?

### **Fragmento II:**

*“Hans Busch en Jena calculó las trayectorias de electrones en un haz de rayos electrónicos y descubrió que el campo magnético de la bobina corta tiene el mismo efecto sobre el haz de electrones que una lente de vidrio convexa con una longitud focal definida sobre un haz de luz. La longitud focal de esta "lente magnética de electrones" puede cambiar continuamente mediante la corriente de la bobina. Busch quería verificar experimentalmente su teoría, pero por razones de tiempo no pudo llevar a cabo nuevos experimentos. Hizo uso de los resultados experimentales que ya había obtenido dieciséis años antes en Gotinga.*

*Para tener en cuenta de manera más precisa las propiedades del punto de escritura de un oscilógrafo de rayos catódicos producido por la bobina corta, verifiqué la teoría de la lente de Busch con un arreglo experimental simple bajo condiciones experimentales mejores, aunque aún inadecuadas. De este modo, encontré un mejor, pero aún no del todo satisfactorio, acuerdo de la escala de imagen con las expectativas teóricas de Busch. La razón principal fue que utilicé una bobina con dimensiones similares a la de Busch, pero cuya distribución de campo a lo largo del eje era demasiado amplia. Mi Studienarbeit, presentada a la Facultad de Ingeniería Electrotécnica en 1929, contenía numerosas imágenes nítidas con diferentes aumentos de una abertura de ánodo irradiada por electrones de 0.3 mm de diámetro, las cuales habían sido tomadas mediante la bobina corta ("lente magnética de electrones") es decir, las primeras imágenes electronópticas registradas.*

---

*La ecuación de Busch para la longitud focal del campo magnético de una bobina corta implicaba que una longitud focal deseada podría lograrse con menos vueltas de amperios a medida que el campo de la bobina se limitará a una región corta a lo largo del eje, porque en ese caso se incrementa el máximo del campo. Por lo tanto, era lógico para mí, como futuro ingeniero electrotécnico, recubrir adecuadamente la bobina con un revestimiento de hierro, dejando un espacio en forma de anillo en el tubo interior. Las mediciones realizadas con dicha bobina mostraron inmediatamente que se había alcanzado la misma longitud focal con un número notablemente menor de vueltas de amperios. Inversamente, de este modo también se puede obtener una longitud focal más corta con un número igual de vueltas de amperios.*

*... Así, se había demostrado por primera vez que, aparte de la luz y las lentes de vidrio, se podían obtener imágenes de especímenes irradiados también mediante haces de electrones y campos magnéticos, e incluso en más de una etapa de imagen. Pero, ¿de qué servían tales imágenes si incluso las rejillas de platino o molibdeno se quemaban a las condiciones de irradiación necesarias para una magnificación de solo 17x? No deseando ser acusados de hacer un espectáculo, Max Knoll y yo acordamos evitar el término microscopio electrónico en la conferencia que Knoll dio en junio de 1931 sobre los avances en la construcción de oscilógrafos de rayos catódicos, donde también describió por primera vez en detalle mis investigaciones electronópticas. Sin embargo, por supuesto, nuestras ideas giraban en torno a un microscopio más eficiente. El límite de resolución del microscopio de luz, debido a la longitud de la onda luminosa, que había sido reconocido 50 años antes por Ernst Abbe y otros, no podría ser relevante a tales aumentos, ya que no se utilizaba luz. Knoll y yo simplemente esperábamos dimensiones extremadamente bajas para los electrones. Como ingenieros, aún no conocíamos la tesis sobre la "onda material" del físico francés De Broglie, que se había propuesto varios años antes. Incluso*

---

*los físicos solo aceptaron esta nueva tesis a regañadientes. Cuando oí hablar de ella por primera vez en el verano de 1931, me decepcionó mucho que incluso para la microscopía electrónica la resolución estuviera nuevamente limitada por una longitud de onda (de la "Materiestrahlung"). Sin embargo, me sentí reconfortado al darme cuenta, con la ayuda de la ecuación de De Broglie, de que estas ondas debían ser alrededor de cinco órdenes de magnitud más cortas que las ondas de luz. Así, no había razón para abandonar el objetivo de superar la resolución de la microscopía de luz mediante la microscopía electrónica.*

*En 1932, Knoll y yo nos atrevimos a hacer una prognosis del límite de resolución del microscopio electrónico. Asumiendo que la ecuación para el límite de resolución del microscopio de luz también es válida para la onda material de los electrones, sustituimos la longitud de onda de la luz por la longitud de onda de los electrones a una tensión de aceleración de 75 kV e insertamos en la relación de Abbe la apertura de imagen de  $2 \times 10^{-2}$  rad que habíamos utilizado anteriormente. Esta apertura de imagen se utiliza aún hoy en día. De este modo, incluso en esa fecha temprana, llegamos a un límite de resolución de  $2.2 \times 10^{-10}$  m, un valor que de hecho se obtuvo 40 años después" (Ruska, 1967, p. 614).*

**Preguntas sobre el fragmento:**

- ¿Cómo crees que la capacidad de ver detalles más finos podría cambiar el enfoque en la investigación científica?
- ¿Cómo puede la comprensión de las propiedades ondulatorias de los electrones influir en el futuro de la microscopía y otras áreas científicas?

**Actividad de cierre:**

Con todos los elementos aquí presentados elabore la relación onda materia estableciendo lo que ocurre en el frente de onda con la muestra para formar una imagen, elabore un escrito que explique cada una de sus ideas, empleando los conceptos científicos trabajados.

---

### **Conclusiones**

Establecer relaciones epistemológicas entre el SEM y su teoría subyacente ha permitido reconocer cómo la formación científica, desde un enfoque histórico, facilitó el estudio del comportamiento corpuscular y ondulatorio de los electrones. Esto ha ampliado nuestro discurso y ha facilitado la adquisición de nuevos conceptos integrados en diferentes teorías que convergen en el SEM, de esta manera este mismo proceso, busca ser proyectado hacia la formación de docentes en Ciencias Naturales, enriqueciendo la comprensión de temas de difícil aprehensión en la física moderna, convirtiendo el SEM en una herramienta multidisciplinar, con un propósito que sobrepasa lo práctico, visualizando el uso teórico de este instrumento en un entorno académico.

Identificar aquellos aspectos teóricos que surgen para la comprensión de la formación de imágenes en el SEM permitió ligar históricamente momentos clave con las dificultades propias de su contexto como, los obstáculos tecnológicos o la adquisición de materiales dado que las interpretaciones de los datos obtenidos estaban delimitadas por la tecnosfera del momento, este análisis también nos ha llevado a comprender la magnitud tecnocientífica detrás de la construcción del SEM y trasladar ese conocimiento a un contexto contemporáneo, donde se presenta la ciencia sin dificultad como un proceso lineal, caracterizado por la falsa dicotomía de éxito o fracaso, en lugar de presentar el esfuerzo de aquellos que han contribuido en su desarrollo a partir de aciertos, desvíos y errores.

Esta investigación buscó articular explicaciones que otorguen un sentido integral a los procesos de interacción entre los electrones y la materia, interpretándolos desde un constructo teórico holístico. Dicho análisis requirió considerar aspectos técnicos, experimentales, teóricos e

incluso filosóficos, integrando tanto las teorías que han posibilitado su desarrollo como los cuestionamientos que pudieron haber conducido a su creación, en este marco, se identificaron los efectos producidos por los electrones al interactuar con una placa metálica de Níquel que funcionó como una rejilla de difracción, analizando el patrón de picos generado como evidencia de un comportamiento ondulatorio, esta interpretación se extrapoló al experimento de la doble rendija con fotones, característico del mismo comportamiento, estableciendo además una relación entre estos aspectos y la resolución de una imagen, de tal manera que el detalle de las imágenes no es producto del desarrollo tecnológico sino de principio teórico.

Considerar las herramientas que permiten magnificar imágenes, junto con los problemas asociados a las fuentes empleadas, ya sean fotones o electrones, invita a reflexionar sobre los elementos que hacen posible este tipo de aumento y su relación con el comportamiento de dichas fuentes al interactuar con la materia, en el marco de la dualidad onda-corpúsculo y resolución, dichos procesos fueron importantes para construir una idea en torno a la formación de imágenes en diferentes escalas y que se presentan como un problema que ha desafiado a los científicos del siglo pasado como a las ideas actuales, de tal forma que entender los problemas que rodean la observación más detallada de una imagen son fundamentados con fragmentos de corte histórico que irradian la complejidad del tema, una dificultad que persiste hasta nuestros días y que sigue siendo objeto de análisis, por tanto, la problematización de diferentes experimentos dentro de una ruta pedagógica se plasman como propuesta de aula, con el objetivo de estimular la reflexión y la introspección de la práctica docente sobre un tema de alta abstracción, como lo es la dualidad onda-corpúsculo en la formación de imágenes a partir del uso del SEM.

Cuestionarse constantemente sobre un mismo fenómeno puede fomentar el desarrollo del discurso, ya que obliga a explicar el fenómeno desde diferentes perspectivas, esta búsqueda de explicaciones facilita el establecimiento de relaciones con fenómenos indirectamente relacionados, que contribuyen a su interpretación al integrarse en el andamiaje epistemológico, el cual se consolida a medida que el fenómeno se vuelve más comprensible y se representa a partir de una explicación más genuina.

---

**Bibliografía**

- Alfonso, J. (2009). Teoría Básica de Microscopía Electrónica de Transmisión. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá.
- Arias, D., Pérez, D y González, J. (2015). Una revisión del estado del arte de la medida de la nanodureza usando el Microscopio de Fuerza Atómica. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 9(18), julio-diciembre.
- Baird, D. (2004). *Thing Knowledge: A Philosophy of Scientific Instruments*. University of California Press.
- Balsas, A. (2020). Heinrich Hertz: de la Física a la Filosofía de la Física. *Universidad Católica Portuguesa. Braga. Naturaleza y Libertad*. No. 5: 24-37.
- Beléndez, A. (1996). *Fundamentos de Óptica para Ingeniería Informática*. Universidad de Alicante. España.
- Bradbury, S. (1968). *The Microscope. Past and Present*. Pergamon International Popular Science Series. Great Britain.
- Blanche, R. (1972). *El método experimental y la filosofía de la física*. F.C.E. México.
- Bohr, N. (1963). Conferencia en memoria de Rutherford 1958. *Nuevos ensayos sobre física atómica y conocimiento humano*. Ed Aguilar. España.
- Calvo, M. L. (2015). La excepcional contribución de Ibn-al-Hytham (Alhacén) a las ciencias. Un intento de aproximación a la ciencia de la óptica en el Renacimiento Musulmán del siglo XI. *Revista Española de Física*, 29(1), 31-35.
- Clavijo, J. (2012). Caracterización de materiales a través de medidas de microscopía electrónica de barrido (SEM). *Revista Elementos*. (3). Universidad de América.

- 
- Davisson, C. y Kunsman, C. (1921). The Scattering of Electrons by Nickel. *Science*. Vol. 54. No. 1404: 522-524.
- Davisson, C y Germer, H. (1927). Diffraction of Electrons by a Crystal of Nickel. *The Physical Review*. Vol. 30, No. 6. pp 705-740.
- Davisson, C. (1930). The Wave Properties of Electrons. *Proceedings of the American Philosophical Society*. Vol. 69. No 1. pp. 247-256.
- Davisson, C. (1937). The discovery of electron waves. Nobel Lecture, December.
- De Broglie, L. (1939). *Materia y Luz*. (Traducido por Xavier Zubiri). Editora Espasa-Calpe Argentina, S.A. (Obra original publicada en 1937).
- Descartes, R. (2010). *Discurso del Método*. (Trad. D. García). Edición por FGS. (Obra original publicada en 1637).
- Díaz, R. y Caballero, G. (2016). *Resolución en microscopios*. *Históptica*.  
<https://histoptica.wordpress.com/resolucion-en-microscopios/>
- Eaton, P., y West, P. (2010). *Atomic Force Microscopy*. Oxford University Press.
- Einstein, A. (1952). *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*. Traducido por Miguel Paredes Larrucea, Alianza editorial S.A. Ediciones Altaya S.A. Madrid, España.
- Egerton, R. (2005). *Physical Principles of Electron Microscopy. An Introduction to TEM, SEM, and AEM*. Springer Science+Business, Inc. United States of America.
- Falcón, N. (2014). *Crónicas Científicas: Historia y curiosidades de las Ciencias Naturales*.
- Falconer, I. (1987). Corpuscles, Electrons and Cathode Rays: J.J. Thomson and the “Discovery of the Electron”. 20, 241-276.
- Fleming, E. (1974). *Artifact Study: A proposed Model*. *Winterthur Portfolio*. Vol. 9. pp. 153-173.

---

Freundlich, M. (1963). Origin of the electron microscope. *Science*, 142(3589), 185-188.

<https://doi.org/10.2307/1712183>

Gehrenbeck, R. (1978). Electron diffraction fifty years ago. *American Institute of Physics. Physics Today*. January.

Goldstein et al. (2018). *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis*. Springer Science+Business, Inc. United States of America.

González-Cano, A. (2015). Alhacén: una revolución óptica. *Arbor*, 191(775), a262.

<https://doi.org/10.3989/arbor.2015.775n5001>

Heisenberg, W. (1979). *Encuentros y conversaciones con Einstein y otros ensayos*. Traducido por Miguel Paredes Larrucea, Alianza editorial S.A. Madrid, España.

Hernández, F. (s.f.). *Historia de la Microscopia Electrónica. Los primeros microscopios electrónicos*. Centro de Investigación y Diagnóstico en parasitología (CIDPA) y Facultad de Medicina. Universidad de Costa Rica.

Hewitt, P. G. (2007). *Física conceptual* (10a ed.). Pearson Educación.

Höttecke, D., Henke, A., y Riess, F. (2010). Implementing History and Philosophy in Science Teaching: Strategies, methods, Results and Experiences from the European HIPST Project. *Science & Education*. No. 15. pp. 1233–1261.

Kortam, N., et al. (2020). The Historical Story behind the Discovery: How does it affect students' attitude towards the scientific endeavor? *Creative education*, 11. pp. 1243-1260.

Kuhn, T. (1970). *La estructura de las revoluciones científicas*. Fondo de Cultura Económica. (Trad. Carlos Solis Santos. 1971). México.

- 
- Leal, A. (2020). El papel de los instrumentos científicos en la enseñanza de las ciencias. Una propuesta de enseñanza de la radiactividad. Trabajo de tesis de Doctorado. Universidad del Valle.
- León, O y Pérez, A. (2005). Filosofía de la ciencia: teoría y observación. México: Siglo XXI.
- Ling, S., Sanny, J y Moebs, W. (2012). Física Universitaria. Vol. 3. OpenStax. Universidad Rice.
- Macías, O. (2008). El concepto de onda en la mecánica cuántica. Vol. 75 No. 155: 237-242.
- Malagón, J., Ayala, M y Sandoval, S. (2011). El experimento en el aula. Comprensión de Fenomenologías y Construcción de Magnitudes. Centro de Investigaciones Universidad Pedagógica Nacional - CIUP. Bogotá D.C.
- Malagón, J. Ayala, M y Sandoval, S. (2013). Construcción de fenomenologías y procesos de formalización: un sentido para la enseñanza de las ciencias. Universidad Pedagógica Nacional.
- Martínez J., Vitola, J y Sandoval, S. (2007). Fundamentos teórico-prácticos del ultrasonido. Tecnura, 10(20), 4-18. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia.
- Megías, M., Molist, P y Pombal, M. (2024). Atlas de histología vegetal y animal. Universidad de Vigo, España. <http://mmegias.webs.uvigo.es/inicio.html>
- Mohajan, H. (2018). Qualitative research methodology in social sciences and related subjects. Journal of Economic Development Environment and People, 7(1), 23-48.
- Muñoz Herrerías, Ó. A. (2024). Jaula de Faraday. Universidad Autónoma de Hidalgo. <https://www.uaeh.edu.mx/scige/boletin/prepa4/n10/r3.html#refe1>
- Muthukrishnan, A., Scully, M y Suhail, M. (2003). The concept of the photon. Quantum Optics.
- MyScope. (2024). Scanning Electron Microscopy. Microscopy Australia. MyScope Training.

---

Narváez, D. (2004). *La microscopía: Herramienta para estudiar células y tejidos*.

<https://www.medic.ula.ve/histologia/anexos/microscopweb/MONOWEB/inicio.htm>

Nobel Lectures. (1967). J.J. Thomson Biographical. The Nobel Prize.

<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1906/thomson/biographical/>

O'Connor, J y Robertson, E. (2014). Julius Plücker. MacTutor. University of St. Andrews, Scotland. Tomado de <https://mathshistory.st-andrews.ac.uk/Biographies/Plucker/>

Padilla, P y Cerecedo H. (2017). Los orígenes de la luz. Universidad Veracruzana.

Pentz, M. (1974). Quantum Theory. The Open University. Traducido por Efraín Barbosa. Carvajal y cía. Cali-Colombia.

Pérez, Y. (2016). Microscopio y técnicas para hacer preparaciones. Tomado de

<https://es.slideshare.net/slideshow/micro-59505216/59505216>

Quiao, C. Wei, J y Chen, L. (2021). An Overview of the Compton Scattering Calculation. Crystals. 11(525).

Reimer, L. (1998). Scanning Electron Microscopy. Physics of Image Formation and Microanalysis. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York.

Rodríguez, G., Gil, J y García, E. (1996). Metodología de la Investigación Cualitativa. Ed. Aljibe, Málaga. España.

Ruska, E. (1987). The Development of the Electron and of Electron Microscopy. Bioscience Reports, 7(8), Nobel Lecture, 8 December 1986.

Sabadell, M. (2012). La electrodinámica cuántica. FEYNMAN. Cuando un fotón conoce a un electrón. Ed. National Geographic.

Sánchez, R y Oliva, N. (2015). Historia del microscopio y su repercusión en la Microbiología. Humanidades Médicas. 15(2): 355-372.

---

Sorroche Cruz, A., y Dumont Botella, A. (2005). Historia del vidrio. Revista Técnica Industrial, Un recorrido histórico por las diversas técnicas de fabricación de este material singular.

Suarez, A., Martí, A., Zuza, K y Guisasola, J. (2022). Las relaciones causa-efecto en las ecuaciones de Maxwell y sus implicaciones en la enseñanza del electromagnetismo en los cursos introductorios de Física. Revista Brasileira De Ensino De Física.

Thermo Fisher Scientific. (2006). Tungsten and CeB6 Electron Sources. Thermo Fisher Scientific. Tomado de <https://www.thermofisher.com/co/en/home/global/forms/industrial/tungsten-ceb6-electron-source.html>

Thomson, J. (1907). The corpuscular theory of matter. Charles Scribner's Sons. New York. EE.UU.

Torres, C. (2018). Aportes a la enseñanza de la física moderna desde el análisis histórico del texto original de Stephen Hawking, breve historia del tiempo: Del Big Bang a los agujeros negros. Trabajo de grado para optar al título de Licenciatura en educación básica con énfasis en ciencias naturales y educación ambiental. Universidad del Valle, Buenaventura-Valle del Cauca. Colombia.

Ul-Hamid, A. (2018). A beginners' guide to scanning electron microscopy. 1st ed. Springer.

Valles, L. (2020). Historia breve del microscopio. En Prospectiva, 1(1), 103-112.

Warren, R. (s.f). National Medal of Science Physical Sciences. Tomado de <https://nationalmedals.org/laureate/walter-m-elsasser/>

Wegerhoff, R., Weidlich, O y Kässens, M. (2006). Basics of light microscopy imaging. GIT Verlag Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.