

**UNA PROPUESTA EXPERIMENTAL PARA VISUALIZAR EL CAMPO MAGNÉTICO
INSPIRADA EN LA ESTRIOSCOPIA SCHLIEREN**

JULIAN DAVID SOTELO ROMAN

LINEA DE PROFUNDIZACION:
LA ENSEÑANZA DE LA CIENCIA Y LA RELACION FISICA MATEMATICA

UNIVERSIDAD PEDAGOGICA NACIONAL

FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE FISICA

LICENCIATURA EN FISICA

BOGOTA D.C 2021

**UNA PROPUESTA EXPERIMENTAL PARA VISUALIZAR EL CAMPO MAGNÉTICO
INSPIRADA EN LA ESTRIOSCOPIA SCHLIEREN**

JULIAN DAVID SOTELO ROMAN

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TITULO DE LICENCIADO EN FISICA

ASESOR:

MAURICIO ROZO CLAVIJO

UNIVERSIDAD PEDAGOGICA NACIONAL

FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE FISICA

LICENCIATURA EN FISICA

BOGOTA D.C 2021

Tabla de contenido

INTRODUCCION.....	4
CAPÍTULO 1 - CONTEXTUALIZACIÓN.....	4
CONTEXTO PROBLEMÁTICO.....	4
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	5
JUSTIFICACIÓN.....	6
PREGUNTA PROBLEMA.....	7
OBJETIVO GENERAL.....	7
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	7
ANTECEDENTES	8
CAPÍTULO 2 – MARCO TEÓRICO Y PEDAGÓGICO	10
MARCO TEÓRICO	10
<i>Estrioscopia Schlieren.....</i>	<i>11</i>
<i>Óptica de electrones.....</i>	<i>12</i>
MARCO PEDAGÓGICO	13
<i>Sobre la enseñanza de la física</i>	<i>13</i>
<i>La enseñanza de la ciencia en Colombia.....</i>	<i>14</i>
CAPÍTULO 3 – ANÁLISIS DE LOS MODELOS ÓPTICO Y ELECTRÓNICO	16
ESTRIOSCOPIA SCHLIEREN EN PROFUNDIDAD	16
<i>Lentes, Objeto Schlieren y receptor</i>	<i>16</i>
<i>Propagación de la luz en un medio no homogéneo.....</i>	<i>17</i>
<i>Fuente puntual de luz y formación de imagen</i>	<i>20</i>
<i>Resumen</i>	<i>21</i>
ENTRANDO EN LA ÓPTICA DE ELECTRONES.....	22
<i>Trayectoria de los electrones al pasar</i> <i>por un campo magnético no homogéneo.....</i>	<i>23</i>
<i>Fuente de electrones.....</i>	<i>24</i>
<i>Lentes magnéticos</i>	<i>28</i>
<i>Pantalla y formación de imagen</i>	<i>29</i>
<i>Consideraciones.....</i>	<i>30</i>
<i>Diagrama esquemático estrioscopia Schlieren electrónica.....</i>	<i>32</i>
CONCLUSIONES.....	33
ANEXOS	33
REFERENCIAS.....	37

Introducción

La óptica permite el estudio de medios continuos y transparentes a través de los cambios de densidad que presenta la sustancia a lo largo de su volumen. Este trabajo presenta una manera de estudiar campos magnéticos similar a como se estudian medios continuos en la óptica, por medio de lo que se denomina como estrioscopía Schlieren electrónica.

Se hace una contextualización tanto histórica como teórica de las ideas preliminares sobre la estrioscopía en óptica y sus orígenes como campo de investigación. Además, se plantean los alcances y objetivos del trabajo.

Se abordan los referentes pedagógicos, entre ellos el profesor Francisco Malagón de la Universidad Pedagógica Nacional, sobre los que se fundamenta el trabajo. En particular, sobre bases constructivistas, las maneras en las que, ampliar el repertorio docente a la hora de enseñar conceptos de electromagnetismo mejora el proceso de enseñanza-aprendizaje. Pues los currículos de la educación media contienen conceptos de óptica y de electromagnetismo que en principio podrían permitir que los estudiantes desarrollen una manera más intuitiva de reconocer el campo magnético y cómo éste interactúa con la materia cargada. Respecto al ámbito disciplinar, sobre como la literatura referente a la estrioscopía Schlieren y los conceptos físicos que lo fundamentan permiten la existencia de un análogo electrónico.

Se presenta un breve contexto sobre la óptica geométrica, posteriormente se realiza un análisis detallado de los sistemas de estrioscopía Schlieren ópticos para así abrir el camino hacia un sistema de estrioscopía Schlieren electrónico. Además, se incentivan a lectores y futuros investigadores a construir un prototipo de dicho sistema electrónico para su implementación en investigaciones posteriores o en escenarios de enseñanza de la física

Capítulo 1

Contextualización

1.1. Contexto problemático

Para entender cómo se llega a la idea de un sistema que aproveche la interacción entre materia y campos magnéticos para el estudio de los mismos tendremos que partir de dos líneas temporales, dichas líneas son las del electromagnetismo clásico y la del estudio de los medios no homogéneos.

Por un lado, esta Robert Hooke, que en el siglo XVII quiso estudiar las sombras que producían las corrientes de aire que brotaban hacia arriba de las velas encendidas, este fenómeno era bien conocido, pero nunca había sido observado con ayuda de un aparato hasta que Hooke inventó lo que hoy se conoce como la estrioscopía Schlieren. Si bien Hooke no fue el primero en proponer aparatos para el estudio de gases, si fue el primero en explicarlo y esta nueva rama de conocimiento que abrió, el estudio de medios no homogéneos, se ramificó a muchos campos técnicos de la época. (Gary Settles, 1949)

Si bien el prototipo de Hooke funcionaba, había muchas cosas por mejorar que no fueron posibles debido a las limitaciones tecnológicas y técnicas de su tiempo. Es en este sentido, la estrioscopía Schlieren pasó por numerosos científicos como Paul Marat, Leon Foucault y Christiaan Huygens. Cada uno de ellos lo implementa y lo mejora para los intereses de la época, pero no es sino hasta que el físico experimental August Toepler lo refina a lo que conocemos hoy y lo llama “método Schlieren”, siendo Schlieren la palabra en alemán que en español traduce estrías o manchas. (Andrew Davidhazy, 2006)

Por otro lado, el electromagnetismo como campo de estudio tuvo una revolución gracias a pensadores como Michael Faraday, quien introdujo el concepto de líneas de fuerza que posteriormente se convertiría en un concepto que refinó James Clerk Maxwell a mediados del siglo XIX en su publicación *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field*. Aquí demuestra que los campos eléctrico y magnético están relacionados y propagan la información a manera de ondas que viajan a la velocidad de la luz.

Estos descubrimientos fueron muy importantes para la naciente física moderna y así, para muchos de los avances tecnológicos de los que se goza actualmente. Bajo esta premisa es evidente el interés que suscita el estudio del campo magnético. Este interés actualmente se evidencia en todas partes, desde el desarrollo de armas capaces de disparar bloques de hierro de media tonelada a mach 2, hasta proyectos que buscan manejar nano-bots médicos capaces de destruir células cancerígenas. Todo esto, explotando el conocimiento que se tiene sobre electromagnetismo.

Estos dos grupos de conocimiento, el estudio de medios continuos y el electromagnetismo, convergen en la primera mitad del siglo XX, cuando por primera vez se mencionó en una carta hacia la National Bureau of Standards de los Estados Unidos, la manera de evidenciar y cuantificar el campo magnético que producían los cables de los establecimientos que se basaba en el sistema óptico de la estrioscopía Schlieren, hasta ahora, no se ha llevado a cabo este método de mapeo de campo ni se ha demostrado de manera teórica su funcionamiento. La estrioscopía Schlieren aprovecha fenómenos ópticos observados en un montaje de componentes ópticos (lentes, cámaras, etc) y resulta útil para evidenciar y medir cambios de densidad en un medio continuo a través de un gráfico de sombras.

Así mismo, lo que llamaremos como estrioscopía Schlieren electrónica se inspira en los principios de funcionamiento del sistema óptico para la estrioscopía Schlieren y los aplica de una

manera similar, aprovechando lo que inicialmente son similitudes en el comportamiento de la luz como partícula con el comportamiento de los electrones como partículas. Esto terminara dando lugar a un sistema de estrioscopía Schlieren electrónico que sirva para visualizar el campo magnético a través de un gráfico de sombras producido por electrones.

En lo que respecta la educación, y en particular, la enseñanza del magnetismo se parte de una serie de conceptos que entienden el campo como un continuo representado a través de líneas de campo que provienen de imanes; estos campos que producen los objetos crean alrededor de sí mismos una zona de acción que permite la interacción con otros imanes o con objetos.

La enseñanza de esta idea de campo tradicionalmente se lleva de manera experimental, pero el tiempo y las fuentes experimentales que permitan el desarrollo profundo de un concepto y un entendimiento intuitivo del campo magnético son limitadas. (M. Ayala, F. Malagón, P. Lugo, 1995).

Es por esto por lo que se mantiene una constante búsqueda de maneras que, aprovechando conceptos previos que tenga el estudiante, den lugar a nuevas maneras de estructurar la progresión conceptual que se da en la enseñanza del campo magnético. Para el presente caso, se entiende que, bajo los estándares de educación, los estudiantes tienen un acercamiento a la óptica geométrica antes de ver campos magnéticos, y son precisamente esas ideas sobre óptica las que van a permitir el andamiaje a conceptos posteriores respecto a la estrioscopía Schlieren electrónica.

1.2. Planteamiento del problema

En 1948 Louis Marton envió una carta hacia la secretaria de estándares de Estados Unidos mostrando un posible método de cuantificar la intensidad de campo magnético que producían cables ferromagnéticos, un sistema de estrioscopía Schlieren electrónico. Desde entonces no se

encuentra literatura que profundice en el análisis teórico de dicho sistema debido a que esta idea no surgió en un ámbito puramente científico, y por esto no siguió su debido camino hacia una investigación rigurosa y formal. Es perfectamente posible que dicho sistema sea construible y aplicable en escenarios actuales, ya sea en la enseñanza del magnetismo o de investigación sobre éste.

Desde el primer montaje de estrioscopía Schlieren en el siglo XVII, la estrioscopía ha tenido un largo camino en el que ha aportado a áreas de la ciencia desde la astronomía hasta la balística. Sin embargo, el estudio de medios no homogéneos se vio, como es usual, guiado por los intereses sociales y políticos de las respectivas épocas. Esto causó que la estrioscopía Schlieren solo fuera una herramienta dentro de los círculos de ingenieros y militares solo siendo usado en balística y en análisis de fluidos.

Es aquí donde convergen el electromagnetismo clásico y el estudio óptico de medios no homogéneos en un intento por analizar el campo magnético considerándolo como un medio continuo y no homogéneo.

Ahora, es sabido que hay campos de estudio como la microscopía electrónica y la física de partículas en donde se aplican conceptos de óptica a los electrones. Siendo esto así, a la fecha no se ha profundizado en la utilización de la estrioscopía Schlieren como estrategia para realizar un mapeo del campo magnético aprovechando las ideas existentes sobre óptica para aplicarlas ya no a fotones, sino a electrones y así poder visualizar campos magnéticos de manera dinámica.

Enfocándose en la enseñanza del electromagnetismo, y en particular, la enseñanza del campo magnético en el aula e incluso en escenarios de divulgación científica es necesario innovar sobre la manera en cómo ésta se enseña. Proponer un método inspirado en el método Schlieren, no con óptica de fotones sino con óptica de electrones será una manera de ampliar las herramientas existentes que se encuentran a disposición de aquellos que pretenden explicar de una manera más

dinámica e intuitiva el campo magnético, así como también la interacción que hay entre éste y la materia.

1.3. Justificación

Debido a que no surgió en un ambiente científico, la estrioscopía Schlieren electrónica no ha tenido su lugar como objeto de investigación, por tanto, intentar construir una máquina que permita visualizar el campo magnético sin un previo estudio de si puede funcionar es ineficiente y poco riguroso.

Esto hace necesario un análisis previo sobre la viabilidad de dicho dispositivo en donde se tomen en cuenta los elementos tanto teóricos como materiales que este dispositivo toma prestados del sistema óptico de estrioscopía Schlieren.

Tanto el desarrollo como el producto final de este trabajo pueden usarse para ampliar la visión que tienen los estudiantes acerca de la interacción que tiene la materia con el campo magnético y cómo este tipo de interacciones están correlacionadas con otras ramas de la física, que tal vez son para ellos inconexas (M. Ayala, F. Malagón, P. Lugo, 1995). Además, al explicar los elementos necesarios para la construcción de un sistema de estrioscopía Schlieren electrónico se abrirá la puerta para llevar a cabo su construcción con materiales de fácil acceso.

1.4. Pregunta problema.

¿Cómo a partir de la estrioscopía Schlieren se puede proponer un montaje experimental que permita visualizar el campo magnético?

1.5. Objetivo General

Proponer una nueva manera de visualizar el campo magnético basada en la estrioscopía Schlieren.

1.6. Objetivos específicos

- Exponer en detalle que es y cómo funciona la estrioscopía Schlieren para visualizar el campo magnético haciendo uso de la estrioscopía Schlieren electrónica.
- Explicar las condiciones y los elementos necesarios que permitan el funcionamiento del dispositivo estrioscopía Schlieren electrónica.
- Realizar un diagrama esquemático de un prototipo para la estrioscopía Schlieren electrónica.

1.7. Antecedentes

1.7.1. Electron Optical ``Schlieren'' Effect. Marton. L. Estados Unidos, Washington D.C.

abril 19, 1948

Este documento no es estrictamente científico, sino que es una carta hacia lo que entonces era la secretaría de estándares en Estados Unidos. En dicha carta se propone por primera vez la posibilidad del método Schlieren electrónico como una manera de medir y cuantificar el campo magnético que producían los cables de un establecimiento para así poder reglamentarlo.

1.7.2. Una perspectiva fenomenológica para la enseñanza del electromagnetismo a nivel introductorio. M. M. Ayala, F. Malagón y P. Lugo. Universidad Pedagógica Nacional Santa Fe de Bogotá, 1995.

Este artículo propone una introducción al electromagnetismo desde una perspectiva fenomenológica, es decir, quieren introducir a los estudiantes de licenciatura en física y en particular del curso Física III al electromagnetismo a partir del estudio de los fenómenos asociados a este.

1.7.3. Interferometric methods for mapping static electric and magnetic fields. Giulio Pozzi, Marco Beleggia, Takeshi Kasama. Universidad de Bologna, Italia. Febrero 1, 2014.

En este artículo se exploran métodos alternativos de mapeo de campos magnéticos y eléctricos estáticos. En particular se centran en aprovechar la óptica electrónica para proponer un método que permita ver nano defectos utilizando microscopios electrónicos. Este artículo resulta sumamente útil para los propósitos de la investigación ya que expone conceptos de física de electrones y como aplicarlos.

1.7.4. La enseñanza del electromagnetismo: una experiencia dentro del modelo de competencias integradas de la universidad de Guadalajara. María Rodríguez, Antonio Gómez, Guillermo Cerpa. Guadalajara, México 8.

Esta investigación aplica la fenomenología a la enseñanza de la electricidad a partir de los conocimientos que los estudiantes tenían de magnetismo, lo logra extrapolando conceptos del magnetismo a la electricidad y muestran que los estudiantes que pasaron por un proceso de este carácter mostraron un mejor manejo conceptual respecto a los que no.

Capítulo 2

Marco Teórico y Pedagógico

2.1 Marco teórico

En diferentes ambientes de la investigación científica ha surgido la necesidad de evidenciar de alguna manera el campo magnético y es así como este campo de estudio está abierto y en constante evolución, produciendo e implementando nuevos y cada vez mejores sistemas que den cuenta de las características del campo magnético en el espacio. (Pozzi. G. et al. 2014).

No se tiene registro de un autor o documento que se encargue de sentar las bases de un dispositivo que trate al campo magnético como un fluido no homogéneo a la luz de los conceptos ópticos que se evidencian en la estrioscopía Schlieren. Sin embargo, muchos pensadores han tenido la oportunidad de estudiar tanto el electromagnetismo como la óptica lo suficiente como para servir de cimiento a la presente investigación.

Resulta difícil hablar sobre electromagnetismo, y en particular sobre el campo magnético sin llegar a citar el trabajo experimental de Michael Faraday o la formalización matemática de James Clerk Maxwell, sin embargo, solo citar a estos dos pensadores ignoraría todo el progreso que se ha hecho al estudiar la interacción de partículas cargadas que atraviesan un campo magnético.

Este es el caso de la óptica de electrones, donde el principal referente va a ser Peter Hawkes, Físico y autor de un libro que recopila los avances que se han hecho en las últimas décadas en lo que respecta a la óptica de electrones y sus aplicaciones en el mundo moderno.

Para los propósitos de este trabajo, los conocimientos sobre la interacción entre materia y campo magnético deben estar respaldados en una sólida base óptica, estas bases serán Max Born quien

documenta los principios bajo los que entendemos el comportamiento de la luz, y de Gary Settles quien recopila los mecanismos de funcionamiento y las aplicaciones de la estrioscopía y de los gráficos de sombras.

En materia de enseñanza se tendrá como precedente el pensamiento constructivista. Considero que a pesar de que el constructivismo es una corriente pedagógica que surgió ya hace varias décadas, sus principios aun sirven para desarrollar estrategias didácticas efectivas. Es cierto que el pensamiento constructivista no es enteramente homogéneo en cuanto a que ningún texto sintetiza la totalidad del pensamiento constructivista, es cierto, sin embargo, que las ideas de base son comunes entre las diferentes líneas de pensamiento constructivista. (Javier Valdez, 2012)

En este sentido la investigación será nutrida por diferentes autores como la pedagoga y profesora de la Universidad de los Andes Carola Hernández y el profesor de la Universidad Pedagógica Nacional Francisco Malagón.

2.1.1 Estrioscopía Schlieren

Nombrado así por la palabra en alemán para “estrías”, la estrioscopía Schlieren es una herramienta que traduce las diferencias de fase de la luz que viaja por un medio no homogéneo en diferencias de brillo que nuestro ojo si puede percibir, permitiendo así poder evidenciar cambios de densidades en medios transparentes no homogéneos. (Gary Settles, 1949)

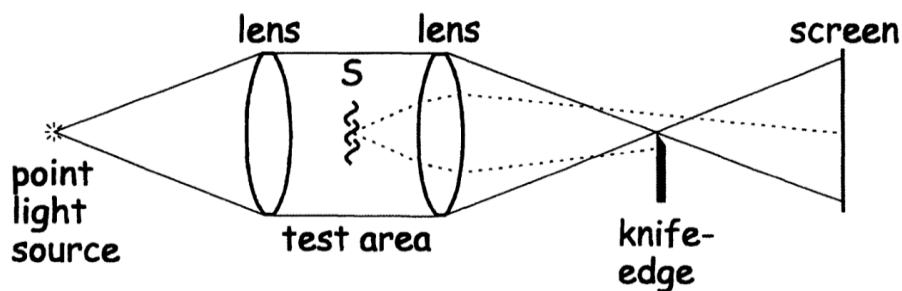


Figura 1. Diagrama de un sistema de estrioscopía Schlieren con una fuente puntual de luz.

El diagrama esquemático de la figura 1 que se muestra nos va a permitir identificar los componentes ópticos requeridos para llevar a cabo la estrioscopia Schlieren y las interacciones que se deben dar entre estos. Inicialmente cabe resaltar que dada la simplicidad de este modelo comparado con el propuesto por August Toepler (figura 2), se abordaran los conceptos base tomando en cuenta el modelo de la figura 1.

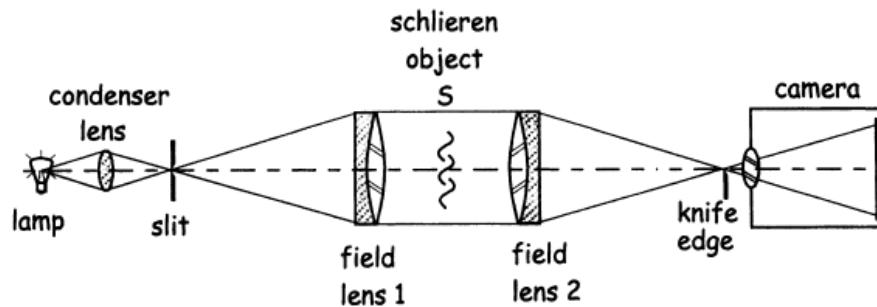


Figura 2. Modelo de estrioscopia Schlieren implementado por August Toepler. tomado de G. Settles.

Para explicar las bases de la estrioscopia Schlieren es preciso centrarse, de momento en el área de prueba que se encuentra entre los lentes. En esta región de prueba debe estar ubicado un objeto que, dada su temperatura u otra característica perturbe la densidad del aire que lo rodea para que la luz que pasa por esas zonas de aire con diferente densidad se refracte de acuerdo con la ley de Snell. Cuando aplicamos esto a todo el volumen de aire obtenemos diferencias en índices de refracción que corresponden con el gradiente de densidad producido por el objeto. Cabe resaltar que el cambio de dirección de la luz al refractarse en un volumen de aire causa que se “junte” luz

en algunas zonas y, como la cantidad de luz se mantiene constante, en otras zonas habrá menos luz.

Una vez la luz atraviesa el volumen de aire en el área de prueba se va a dirigir hacia un receptor que, si bien puede ser una pantalla, también puede ser una cámara. Sin embargo, es usual ver que se utiliza una navaja o un objeto afilado para tapar parte de la luz proveniente del área de prueba. Si menos luz llega, el brillo de la imagen proyectada en la pantalla va a disminuir, haciendo que las tenues diferencias en el brillo causadas por la desviación de la luz en el área de prueba sean mucho más notorias y haciendo que la imagen tenga mejor resolución. (Andrew Davidhazy, 2006)

2.1.2. Óptica de electrones

Debido a que la estrioscopía Schlieren está fundamentada en la óptica geométrica y, por ende, la noción corpuscular y clásica de la luz, se asumirá en la óptica de electrones como corpúsculos y se los tratará sin tomar en cuenta efectos cuánticos.

Ya que en ambos casos se asume el comportamiento de partículas (fotones y electrones), pero se comportan e interactúan de manera distinta con el entorno, se necesita encontrar conceptos similares que sirvan de base teórica para que un sistema de estrioscopía Schlieren pueda funcionar con electrones. Inicialmente consideremos un electrón moviéndose a través de un campo magnético producido por un imán. Este electrón en movimiento cambiará la dirección de la velocidad debido a la fuerza de Lorentz, este cambio será proporcional a la velocidad del electrón y a la intensidad del campo magnético en el lugar donde está. Esto significa que, para el caso del imán, donde la intensidad de campo magnético no es constante en todas las regiones del espacio, un electrón que se encuentre con el campo magnético va a cambiar la dirección de su movimiento dependiendo de donde interactúe con el mismo.

Si tomamos ahora muchos electrones bombardeando el espacio que comprende el campo magnético del imán como si estuviéramos hablando de una “linterna” de electrones, cada uno se desviara de su camino inicial dependiendo del gradiente de intensidad del campo magnético del imán. De manera similar con la luz en el sistema óptico, podemos ver que la imagen que resulta de “atrapar” los electrones en una pantalla es resultado directo de la disposición e intensidad del campo magnético, en este caso, del imán. Es el objetivo de este trabajo encontrar todos los elementos teóricos y materiales que permitan la transición de la estrioscopía Schlieren óptica a la electrónica y ponerlos en una disposición que permita observar el campo magnético de cualquier cosa que lo produzca.

2.2 Sobre la enseñanza de la física

Cuando se habla de enseñanza de ciencias y en particular de la física es importante tener en cuenta que la percepción y asimilación de cualquier idea o concepto va a estar permeada por la visión preliminar que el sujeto tiene sobre ese concepto, y por la interacción social o física que tiene con el ambiente. (Yaya y Hernández, 2010)

Pero es preciso, ahondar en las temáticas particulares sobre las cuales está fundamentado este trabajo y cómo estas son enseñadas. Primeramente, podemos decir que la óptica geométrica ya se enseña desde la educación media en Colombia y que los contenidos dentro de la óptica geométrica que se imparten son suficientes para entender la estrioscopía Schlieren y su posterior análogo electrónico (MEN, 2006). Sin embargo, la visión corpuscular de los electrones y la interacción que tienen con los campos magnéticos no está dentro de los contenidos propuestos por el ministerio de educación.

Es aquí donde los conceptos que se tengan sobre óptica geométrica van a ser los cimientos sobre los que se construya la teoría sobre los electrones asumiendo el comportamiento como partícula, los campos magnéticos y la interacción entre los dos últimos.

2.2.1 La enseñanza de las ciencias físicas en Colombia

La educación básica y media en Colombia han estado matizadas por muchísimos factores como la localización geográfica, las posibilidades de acceso a las TIC o el estado socioeconómico de la región. Es pues, que en esta sección presentare mis visiones sobre la enseñanza de la ciencia y de la física en Colombia para poder hablar de la propuesta metodológica de este trabajo en el apartado pedagógico y disciplinar.

Los enfoques con los que se ha abordado la enseñanza provienen más de la estructuración de elementos políticos, administrativos y normativos, que del establecimiento de criterios sobre lo que debe ser la función de la enseñanza. (Castaño Cuellar et al, 1998)

Desde hace un par de décadas se sabe a raíz de investigaciones que la enseñanza no es simplemente un manual donde se encuentra lo que se debe enseñar y cómo hacerlo (Díaz y Muñoz, 1990). Sino que es un ente dinámico que debe estar guiado principalmente por aspectos culturales que delimitan un campo de problemáticas en donde los actores del proceso interactúan. Aunque no es preciso el momento en el que en Colombia se empezó a tomar la enseñanza como un aspecto mejorable es cierto que las problemáticas que suscitan enseñanza provienen no de uno, sino de dos lugares: las comunidades nativas de la región y los colonizadores europeos (Díaz y Muñoz, 1990).

Sin embargo, eventos como la expedición botánica que lidero José Celestino Mutis o la expedición corográfica de Agustín Codazzi, que para la época es lo más parecido en la región a la

ciencia actual como se conoce, empieza a establecer cierta prelación respecto al conocimiento indígena.

“De esta forma, se empiezan a formar campos de conocimiento predominantes en este caso, los marcos de conocimiento europeos que terminaron moldeando el sistema de creencias nativo.”

(Castaño Cuellar et al, 1998)

Mas adelante se tomó el modelo educativo occidental proveniente de la revolución industrial, sin nosotros haber tenido una. Dicho esto, considero que nuestra educación en ciencias ha tomado prestados muchos marcos de problemáticas de regiones externas a la propia, trayendo consigo diferentes esquemas de valores que alteran al final la enseñanza de la ciencia y de la física. Es pues, que necesitamos un acercamiento más propio dadas las condiciones socioculturales actuales de pensarnos la enseñanza no solo desde el contexto nacional sino también desde el de un mundo globalizado y moderno.

Es en este contexto moderno y globalizado que es preciso ampliar la visión de los estudiantes acerca de las teorías modernas que han surgido en la física con ideas y conceptos intermedios entre la física clásica determinista y ordenada, y la física moderna caótica y abstracta.

Como en la historia, estos conceptos intermedios no están desligados de las teorías previas y tampoco surgen de la nada, es preciso partir de las ideas previas que se espera tengan los estudiantes sobre teorías clásicas, apoyar este proceso incentivando el debate sano y exponiendo a través de las TIC argumentos e ideas que nutran el desarrollo de estos nuevos conceptos algo más abstractos en los estudiantes.

Tomando lo anterior en cuenta, es seguro decir que las teorías educativas que más se acoplan con esta perspectiva obedecen al constructivismo social debido al rol de guía que cumplen los productos de este trabajo en ampliar las visiones y crear relaciones respecto a las teorías físicas de los estudiantes. Si bien es cierto que el constructivismo tiene variantes y que estas no son

precisamente novedosas, el constructivismo puede ser de gran utilidad tomando en cuenta que estas variantes coinciden en que el conocimiento es un proceso dinámico entre el sujeto y el ambiente y no solo sobreescritura de información nueva sobre información preexistente (Ordóñez, 2006)

Esta perspectiva del constructivismo social parte del hecho que los estudiantes han tenido formación previa en magnetismo y óptica, ítems que se encuentran en los estándares de educación en Colombia para grado once (MEN, 2006). Partiendo de estas ideas previas se busca que a través de los productos de este trabajo se pueda construir una imagen sobre la interacción entre electrones y el campo magnético.

Capítulo 3

Análisis de los modelos óptico y electrónico

3.1. Óptica geométrica

Antes de que se entendiera completamente la naturaleza de la luz se podía estudiar su comportamiento y describir fenómenos ópticos de manera efectiva gracias a la óptica geométrica.

Considerando que la longitud de onda de la luz que interactúa con los objetos cotidianos es mucho más pequeña que éstos se pueden obviar los efectos de interferencia y difracción.

Estos rayos rectos que representan la luz se construyen trazando líneas rectas perpendiculares a la superficie del emisor de luz, además, cuando estos rayos interactúan con otros materiales y se debe actualizar o redibujar el rayo debido a un cambio en su dirección siguiendo dos reglas importantes que tienen lugar dependiendo de si el material refleja la luz o la refracta; entendiendo que absorber y transmitir la luz deja inalterada la dirección del rayo que lo representa.

La primera regla establece que el ángulo de incidencia del rayo de luz con respecto a la superficie debe ser el mismo ángulo con el que se traza el del rayo de luz reflejado, $\varphi_i = \varphi_r$. Es importante destacar que en la práctica la misma imagen se puede formar ya sea con espejos o con lentes debido a que ambos tienen distancia focal positiva y convergen rayos paralelos en un punto focal (figura 4), permitiendo el análisis de sistemas con lentes y espejos solo teniendo en cuenta si son cóncavos o convexos.

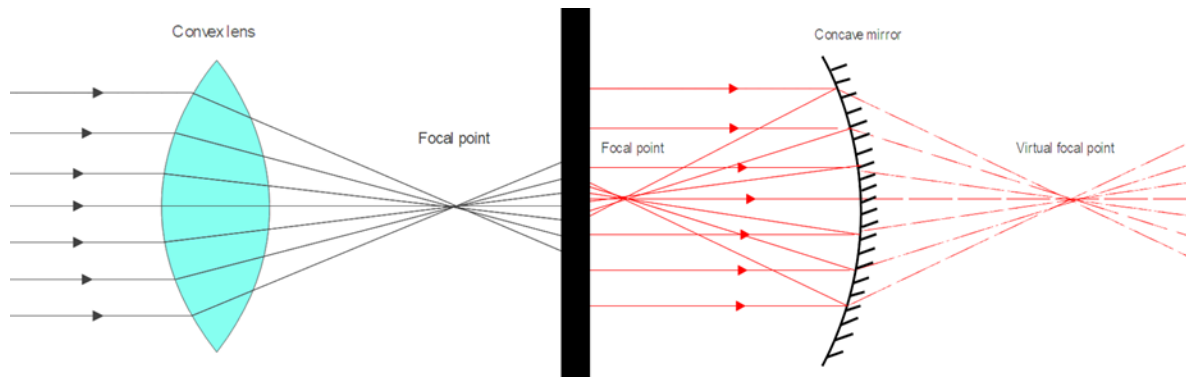


Figura 4. Similitud entre lente convexo (izquierda) y espejo cóncavo (derecha). Autoría propia

La segunda regla involucra el índice de refracción “n” de los medios, debido a que esta regla es de particular interés a la hora de analizar sistemas de estrioscopía Schlieren. Más adelante se hará un análisis en profundidad de cómo al pasar de un medio a otro, cada uno con diferente “n” la luz se desvía de su trayectoria debido a su cambio de velocidad, $n_1 * \sin(\varphi_1) = n_2 * \sin(\varphi_2)$.

3.2. Estrioscopía Schlieren

Con el propósito de establecer relaciones entre un sistema óptico y un sistema electrónico de estrioscopía Schlieren, debemos empezar haciendo una profundización acerca de los diferentes elementos que componen el sistema óptico y cómo estos interactúan con la luz para poder visualizar diferencias de densidad en un medio transparente y no homogéneo

3.2.1. Lentes, Objeto Schlieren y Receptor.

Pese a que sin alguno de estos tres elementos la estrioscopía Schlieren no tendría lugar, no merecen una sección propia debido a lo relativamente simple de su funcionamiento. Por ejemplo, los dos lentes que se muestran en la Figura 1 pueden ser intercambiados por un espejo cóncavo, cambiando la disposición de los elementos ópticos, pero resultando en el mismo fenómeno, es entonces que la disposición de los lentes tiene que ir de la mano con la ubicación del objeto Schlieren.

Como segundo elemento, el objeto Schlieren es la zona del espacio en donde está el medio transparente y no homogéneo que se quiere estudiar. Ejemplos de un objeto Schlieren pueden ser el aire o el agua pues cumplen con las condiciones necesarias para que se pueda formar una imagen en el receptor.

Por último, a la derecha de la Figura 1 se encuentra el receptor o pantalla, aquí es donde se evidencia la traducción de diferencias de fase en diferencias de intensidad que muestra la luz al pasar por el objeto Schlieren, es decir, el gráfico de sombras que da cuenta de las diferencias de densidad en el objeto Schlieren.

Mas adelante veremos cómo estos componentes que para la óptica son relativamente simples se vuelven bastante más complejos si se quiere hablar de electrones.

3.2.2. Propagación de la luz en un medio no homogéneo

Como se había establecido en la sección 3.1., cuando la luz pasa de un medio a otro y estos tienen un índice de refracción distintos, la velocidad de la luz va a cambiar, cambiando su dirección de acuerdo con la segunda regla de la óptica geométrica, es decir el índice de refracción es función de la velocidad de la luz en el medio por el que se propaga.

$$n = \frac{c_0}{c} \quad 1$$

Donde C_0 es la velocidad de la luz en un medio distinto del vacío y C corresponde a la velocidad de la luz en el vacío.

Teniendo un volumen de, por ejemplo, aire con un gradiente de densidades y por tanto un gradiente de índices de refracción es posible calcular la curvatura de un rayo de luz que atraviesa dicho medio mediante la óptica geométrica.

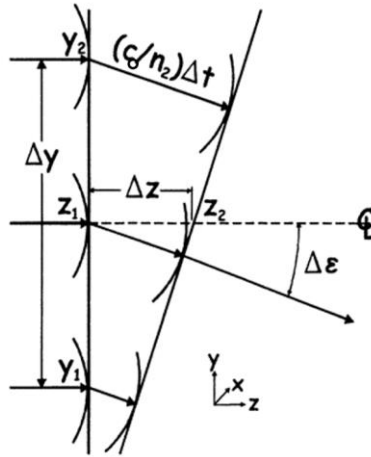


Figura 3 Diagrama elemental de la refracción de la luz por un gradiente de índice de refracción $\frac{dn}{dy}$. Tomado de G.

Settles. Shlieren and shadowgraph techniques

Si imaginamos un sistema como el representado en la Figura 3, donde por el eje z se propaga la luz y, luego asumimos un gradiente de índice de refracción vertical negativo $\frac{dn}{dy} < 0$, y ningún gradiente en las direcciones x o z. Como luego se muestra en la Figura. 3, tomamos un frente de onda plano de la luz que es inicialmente vertical al pasar a través de z_1 , y por lo tanto es normal a la línea central óptica horizontal z. Como este frente de onda se propaga a través del medio de z_1

a z_2 , cubre la distancia diferencial Δz en un tiempo diferencial Δt y se refracta a través del ángulo diferencial $\Delta \varepsilon$. Dado que los rayos de luz siempre apuntan normales a sus frentes de onda, el rayo horizontal que pasa originalmente por z_1 es igualmente refractado a través del ángulo diferencial $\Delta \varepsilon$.

De esta manera podemos generalizar para más dimensiones y obtener el conjunto de ecuaciones

$$\frac{\partial^2 x}{\partial z^2} = \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial x} , \quad \frac{\partial^2 y}{\partial z^2} = \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial y} \quad 2$$

Pese a que los sistemas de estrioscopía Schlieren pueden volverse tan complejos como se quiera en términos de los objetos estudiados, la cantidad de componentes ópticos usados o lo intrincado de su configuración. Estas ecuaciones son la base matemática para describir dichos sistemas tomando como base la óptica geométrica y los desarrollos en “*G. Settles. Shlieren and shadowgraph techniques*”.

3.2.3. Fuente puntual de luz y formación de imagen

En virtud de mantener este modelo explicativo lo suficientemente sencillo como para que posteriormente sea aplicable a un sistema de estrioscopía Schlieren electrónico, no se va a tratar con fuentes de luz longitudinales, como se observa en la realidad, sino que vamos a aproximarnos por el caso de una fuente puntual de luz y como desde esta consideración se razona la formación de la imagen.

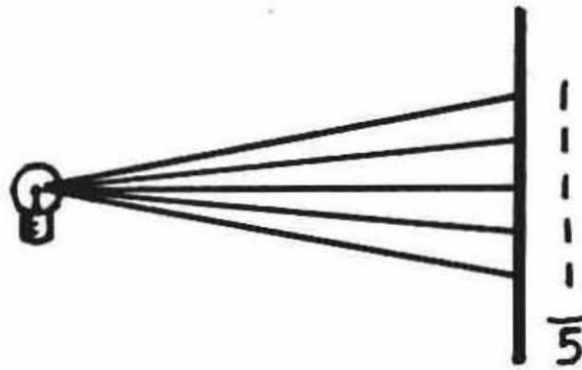


Figura 4. Diagrama geométrico para una fuente puntual de luz.

Tomado de A. Davidhazy, *Introduction to shadowgraph and Schlieren imaging*

Si tomamos como referencia un sistema como el de la Figura 4, en donde los rayos de luz salen de una fuente puntual de luz (a la izquierda) y al llegar al receptor (a la derecha), este mide la intensidad de la luz en función de cuantos rayos llegan a cada zona de éste. Podemos ver que a cada zona del receptor le corresponde una cantidad igual de rayos de luz, en otras palabras, todo el receptor está iluminado con la misma intensidad.

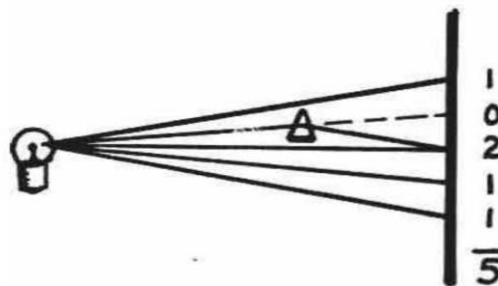


Figura 5. Diagrama geométrico para fuente puntual de luz con elemento refractivo.

Tomado de A. Davidhazy, *Introduction to shadowgraph and Schlieren imaging*

Ahora, si se piensa en el mismo sistema de antes, pero poniendo un elemento refractivo en la trayectoria de un haz de luz tal que este haz se desvíe, como se muestra en la Figura 5, veremos que el receptor ya no está iluminado con una intensidad de luz igual en toda su superficie, sino que, al desviarse un rayo de luz, una zona se oscurece y otra se vuelve más brillante.

Este fenómeno, en principio es lo que causa que al poner un objeto Schlieren, que se puede pensar como un continuo de elementos refractivos, cause que en una pantalla se vean zonas claras y oscuras que corresponden a los cambios de densidad en dicho objeto Schlieren.



Figura 6. Estrioscopia Schlieren del aire calentado por un caudín.

Tomado de A. Davidhazy, Introduction to shadowgraph and Schlieren imaging

3.2. Óptica de electrones

Los siguientes desarrollos teóricos y matemáticos van a estar fundamentados en los comportamientos similares que existen entre el modelo óptico visto anteriormente y un modelo clásico de dinámica de electrones. Para lograr el objetivo se hace una relación entre las diferentes magnitudes que serán utilizadas para el modelo óptico con electrones:

Densidad del medio (ρ) \rightarrow Intensidad de campo magnetico (\vec{B})

Indice de refracción (n) \rightarrow Relacion carga – masa ($\frac{Q}{m}$)

Desviación de la luz (θ) \rightarrow Cambio de la velocidad del electrón (Δv)

Estas tres relaciones, que serán explicadas más a profundidad, pueden verse como una analogía entre los componentes del “mundo” óptico y componentes del “mundo” de los electrones. De la misma manera que un fotón se desvía un ángulo θ al interactuar con un medio con índice de refracción n y un gradiente de densidades $\nabla\rho$. De igual forma se asume que un haz de electrones será afectado en su velocidad $\Delta\vec{v}$ al interactuar con un campo magnético que tenga un gradiente de intensidades $\nabla|\vec{B}|$.

3.2.1. Trayectoria de los electrones al pasar por un campo magnético no homogéneo

De la misma manera que nos acercamos a una representación matemática para la deflexión de los fotones en el sistema óptico, ahora se mostrará a partir de un diagrama (figura 7) el proceso que queremos realizar con electrones.

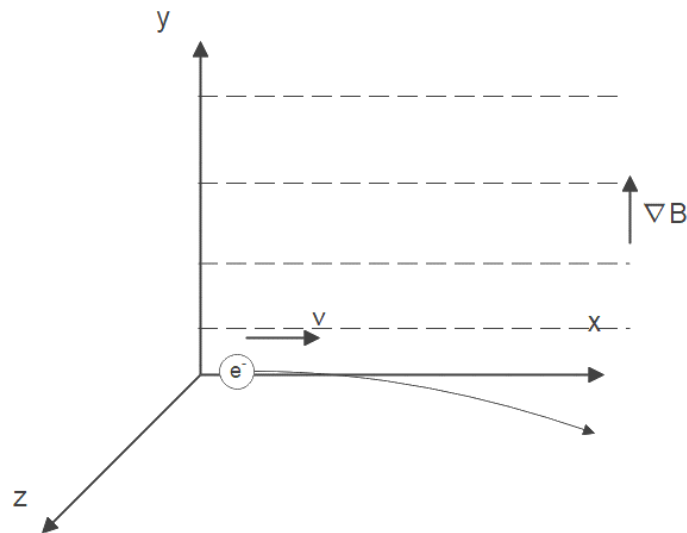


Figura 7. Trayectoria de un electrón en movimiento al interactuar con un campo magnético. Autoría propia

Dado que los fotones se desvían al pasar por un gradiente de un campo escalar, que es la densidad de un medio, se puede calcular un ángulo de desviación de la luz al atravesar dicho medio. Sin embargo, los electrones y su interacción con el campo magnético solo permiten calcular un cambio en la dirección de la velocidad de este, asumiendo que la magnitud de ésta permanece constante.

Haciendo un análisis geométrico similar al del apartado óptico llegamos a la siguiente ecuación, cuya deducción se encuentra en el anexo 1.

$$\frac{\partial v}{\partial z} = \frac{Q}{m} \left(\vec{v}_x \times \overline{\frac{\partial B}{\partial y}} \right) \quad 3$$

Hay varias cosas interesantes sobre esta ecuación, primero, nótese que, al surgir un producto vectorial entre la velocidad del electrón y el gradiente del campo magnético, la desviación del electrón va a ser perpendicular al eje óptico (el eje de las x en la figura 7) y a la dirección en la que varía el campo magnético, lo cual difiere del modelo óptico. Además, es muy importante resaltar que la forma de esta ecuación es bastante parecida a la que tenemos en el modelo óptico

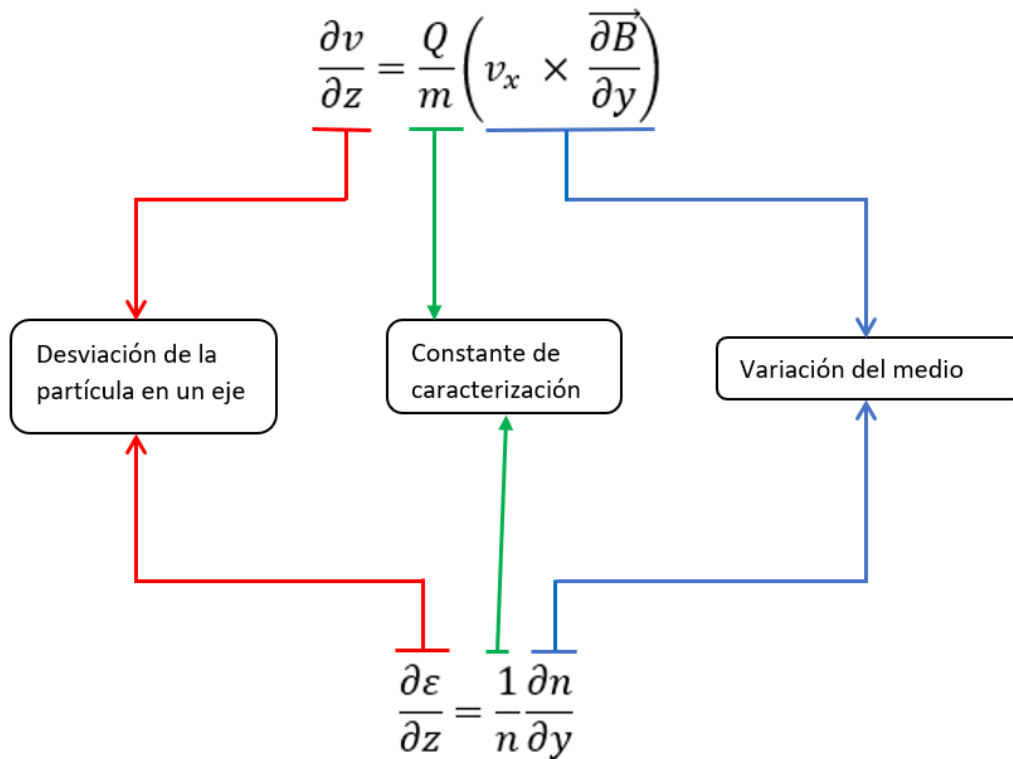


Figura 8. Similitud entre las ecuaciones que describen el movimiento de los electrones y la luz. Autoría propia

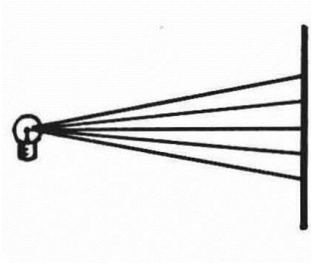
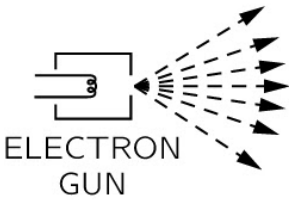
En la figura 8 se muestran las similitudes de las ecuaciones que describen el cambio de dirección en el modelo óptico y en el de electrones a través de los términos que las componen. Se puede observar en el lado izquierdo de las ecuaciones mostradas arriba, un término que representa la desviación o cambio de trayectoria que tiene la partícula cuando interactúa con el medio.

En el lado derecho de las ecuaciones hay dos términos, una constante que caracteriza la interacción de la partícula con el medio a través de las propiedades que se conocen y que son relevantes en el análisis de esta. En el caso los electrones, es la relación carga masa.

Por último, hay un término que caracteriza cómo cambia el medio por donde se desplaza la partícula, que en este caso escogimos que solo varíe en uno de los ejes coordenados.

Las similitudes que se encuentran a través del análisis matemático de los dos sistemas constituyen un argumento fuerte a favor de esta nueva manera de aprovechar el comportamiento de los electrones. Esto al igual que el sistema óptico permitirá traducir diferencias en las trayectorias de los electrones en diferencias de brillo al impactar con una pantalla fluorescente o algún receptor.

La siguiente tabla permite dar una mirada a los análogos electrónicos de los componentes ópticos usados en la estrioscopía Schlieren convencional, así como también características propias de cada elemento aplicables a un escenario práctico.

Componentes de un sistema de estrioscopía Schlieren	
Óptico	Electrónico
Fuente	
<p>Emisor de luz</p>  <p><i>Figura 10. Diagrama geométrico para una fuente puntual de luz. Tomado de A. Davidhazy, Introduction to shadowgraph and Schlieren imaging</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Se modela como una fuente puntual de luz para el análisis desde la óptica geométrica. • Es posible usar cualquier frecuencia o combinación de frecuencias dentro del espectro visible. 	<p>Dispositivo termoiónico</p>  <p><i>Figura 9 Aproximación a fuente de electrones con una esfera de metal sometida a una diferencia de potencial dentro de una caja con un agujero en ella. Richard. A. Feynman. Feynman lectures Vol. 1.</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Si el agujero está a un potencial menor que el del filamento los electrones que se desprenden de este se verán acelerados hacia la apertura de la caja. se puede idealizar este dispositivo como una fuente puntual de electrones. • Los electrones que emiten las fuentes se representan de la misma manera que en óptica geométrica, como rayos rectos.

Manipulación del haz

Lente convexo

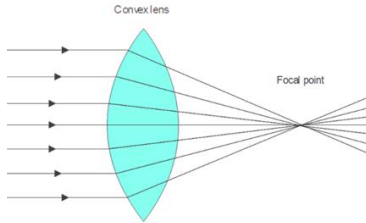


Figura 11 Representación de lente convexo desde la óptica geométrica. Autoría propia

- Diferentes configuraciones para sistemas de estrioscopía Schlieren pueden requerir diferentes tipos de lentes o espejos, sin embargo, el propósito fundamental de los lentes es el de manipular la dirección de los rayos de luz a conveniencia.

Lentes electromagnéticas

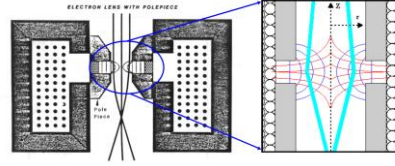


Figura 12 Diagrama general de un lente electromagnético (izquierda) y representación de la trayectoria de los electrones (derecha). Tomado de Universidad de Salento "Electromagnetic lenses".

- Por medio de campos electromagnéticos se puede manipular la dirección en la que viajan los electrones, esto permite focalizar el haz de electrones a conveniencia.
- La cantidad de desviación de los electrones en el eje óptico depende de la velocidad que lleven y del tiempo de interacción con el lente electromagnético

Objeto Schlieren / Objeto de prueba

Medios no homogéneos y transparentes

Por ejemplo: Aire, Agua, Nitrógeno gaseoso, oxígeno gaseoso, etc.

- Cualquier medio continuo y transparente puede tener diferencias de densidad a lo largo de su extensión, permitiendo ser analizado a través de la estrioscopía Schlieren.
- Ejemplos de estos medios son compuestos como el agua o el aire.

Campo magnético no homogéneo



Figura 13. Representación del campo magnético producido por un imán de barra. Tomado de <https://www.freepng.es/png-qnnqxi/>. Imagen de acceso libre

- A través de las variaciones de intensidad y dirección que se presentan en las vecindades de un "emisor" de campo magnético como un imán de barra es posible realizar la estrioscopía Schlieren.


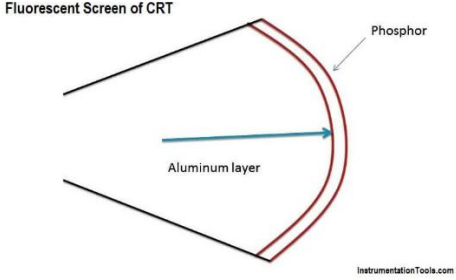
Receptor	
<p style="text-align: center;">Pantalla / Muro</p>  <p style="text-align: center;"><i>Figura 14. Estrioscopía Schlieren del aire calentado por un caufín. Tomado de A. Davidhazy, Introduction to shadowgraph and Schlieren imaging</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • De preferencia color blanco, es aquí donde se forma proyección bidimensional que corresponde a los cambios de densidad en el objeto Schlieren 	<p style="text-align: center;">Sensor de electrones / Pantalla con compuesto sensible</p>  <p style="text-align: center;"><i>Figura 15. Diagrama esquemático de una pantalla fluorescente. Tomado de https://instrumentationtools.com/crt-fluorescent-screen/. Imagen de acceso libre</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Si bien es posible usar un sensor de electrones digital como los usados en microscopía electrónica las pantallas fluorescentes ofrecen una alternativa mucho más barata a la hora de hacer un prototipo funcional • La intensidad lumínica de estas pantallas depende de la cantidad de electrones que interactúen con la capa de fosforo y aluminio.

Tabla 1. Se muestra un cuadro comparativo entre componentes para sistemas de estrioscopía Schlieren óptica con los componentes para sistemas de estrioscopía Schlieren electrónica.

Si los electrones pasan por un medio dieléctrico antes de llegar a la pantalla es posible que los campos eléctricos de los electrones en movimiento induzcan un campo eléctrico dentro del dieléctrico, esto causaría interferencias en la imagen o directamente que sea imposible obtener una imagen real del objeto Schlieren. Por esto, si se quiere construir un sistema de estrioscopía Schlieren electrónico, es necesario que todo el sistema esté sellado al vacío, de igual manera a como lo están los tubos de rayos catódicos.

También es recomendable, intentar diferentes configuraciones del montaje, pues este trabajo no se encarga de calcular distancias específicas entre componentes o siquiera si son enteramente necesarios, es decir, se invita a que se prueben diferentes configuraciones del sistema para encontrar una óptima.

3.2. Interacción entre la materia cargada y campos magnéticos

Si bien lo que se diga a partir de ahora aplica para toda la materia cargada, solo me referiré a los electrones debido a que son la unidad fundamental de carga eléctrica y uno de los elementos principales para la estrioscopía Schlieren electrónica.

Mayormente se pueden representar sistemas que involucren electrones libres en movimiento como se representan sistemas de óptica geométrica, no obstante, el hecho de que los electrones colisionan entre sí y se mueven siguiendo un conjunto de reglas diferentes.

Una de estas reglas es la fuerza de Lorentz que para el caso de los electrones determina la manera en cómo se va a mover cuando interactúa con un campo magnético. Debido a que la óptica de electrones es en su mayoría homologa a la óptica geométrica es posible partir de ideas propias de la óptica geométrica para analizar sistemas de óptica de electrones. Para el caso de la estrioscopía Schlieren electrónica se piensa en un “elemento refractivo” que representa una región del espacio donde el campo magnético cambia respecto a sus alrededores inmediatos desviando el electrón de manera distinta a como lo harían las regiones del espacio adyacentes.

Para el caso en el que la ecuación 3 es aplicable, nótese como la cantidad de desviación o el cambio de la velocidad del electrón depende directamente del tiempo de interacción con el campo magnético y, por tanto, a la velocidad que este lleva, es decir, entre más sea la rapidez con la que se mueve el electrón, menos acentuado va a ser el cambio de dirección que va a tener.

Esto es de particular importancia al considerarlo en un escenario como el de la estrioscopia Schlieren electrónica ya que permite pensar en lentes electromagnéticas con intensidad de campo fija para así alterar la dirección de los electrones variando su velocidad, algo mucho más fácil de hacer en la práctica alterando las condiciones de la fuente termoiónica.

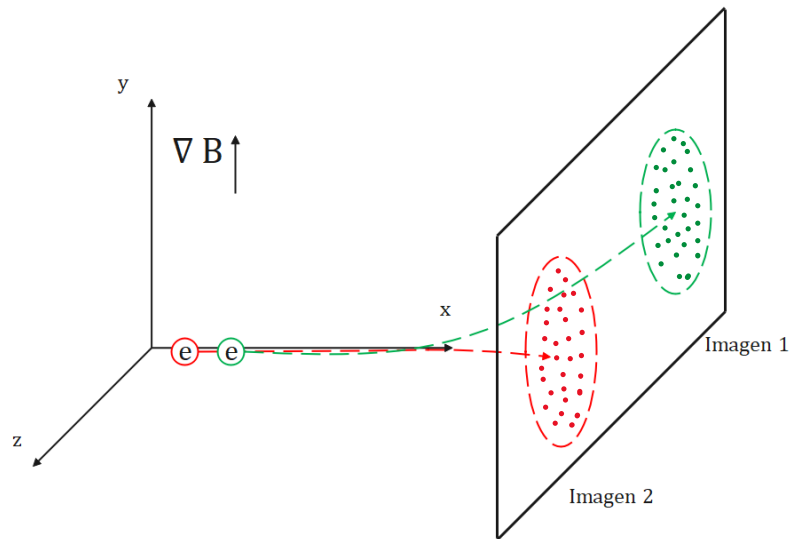


Figura 16. Representación de imágenes creadas por efecto del spin del electrón. Autoría propia

Un efecto como el que ilustra la figura 16 que seguramente se observe es el de dos imágenes, iguales y tal vez superpuestas del mismo objeto Schlieren. Esto se debe a que a grandes rasgos la mitad de los electrones tendrán un cambio de velocidad hacia el eje z positivo mientras que la otra mitad lo tendrán hacia el eje z negativo, debido al spin del electrón. Si se lanza un número suficiente de electrones ambas imágenes tendrán la misma información y la distancia entre ambas imágenes va a ser proporcional a la distancia entre el objeto Schlieren y la pantalla.

Otra particularidad que surge de analizar la ecuación 3 bajo el contexto de la estrioscopia Schlieren electrónica se encuentra en el producto vectorial que involucra el gradiente de campo

magnético y la velocidad del electrón $\left(\vec{v}_x \times \frac{\partial B}{\partial y}\right)$. Aquí la desviación se presenta en un eje perpendicular tanto al gradiente de campo como a la velocidad del electrón, esto significa que la imagen que se forma en el receptor estaría rotada noventa grados respecto al objeto Schlieren. Dicha imagen formada corresponde a proyección bidimensional del objeto Schlieren.

3.3. Diagrama esquemático para Estrioscopia Schlieren electrónica

A continuación, se presentará un diagrama esquemático para un sistema de estrioscopia Schlieren electrónica que recopila todos los elementos del modelo electrónico discutidos hasta ahora (figura 17).

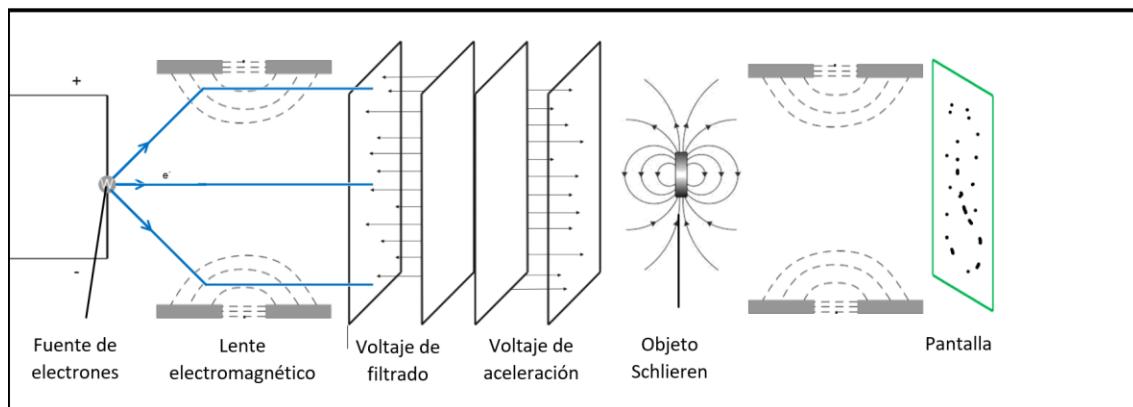


Figura 17. Diagrama esquemático de un dispositivo de estrioscopia Schlieren electrónico en dos dimensiones.

Autoría propia

Teniendo un diagrama esquemático como el mostrado en la figura 17 es natural preguntarse cómo se vería en la realidad la imagen producida en un montaje con esta disposición de elementos. Desde aquí, podemos comparar nuevamente lo que se ve en el sistema óptico, un

conjunto de zonas oscuras y claras donde las zonas oscuras corresponden a densidades altas y zonas claras corresponden a densidades bajas. Entonces podemos decir que, si replicamos la figura 17, con un imán de barra podríamos ver un gradiente de “color” que disminuye hacia afuera con el centro oscuro debido a la “sombra” del imán.

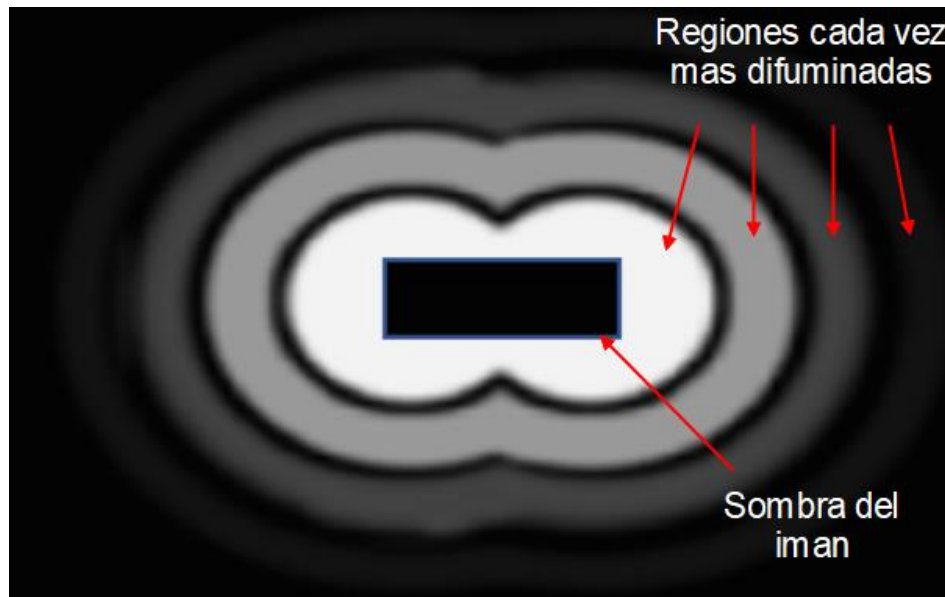


Figura 18. Predicción sobre imagen producida por un imán de barra dentro de un sistema de estrioscopia Schlieren electrónico. Autoría propia

Michael Faraday dio ideas iniciales sobre la naturaleza y la distribución de la región sobre la que interactuaban los cuerpos que producen campos magnéticos o aquellos sensibles a estos al introducir la noción de las líneas de campo y su geometría. A las líneas de campo inicialmente se les nombraba “líneas de fuerza” y se usaban para representar campos electrostáticos y magnéticos.

Para el caso de los campos magnéticos, las líneas tienen la propiedad de que siempre inician en uno de los polos del imán y terminan en el otro (figura 19). Justo esta propiedad luego se volvió una ley formalizada por James Maxwell. Estas líneas se representan con una dirección y se dibujan mas juntas entre mas cerca se esté del imán, esta manera de representar el campo

magnético permite intuir la dirección de movimiento de cargas en movimiento y de dipolos magnéticos que se encuentran cerca uno del otro.

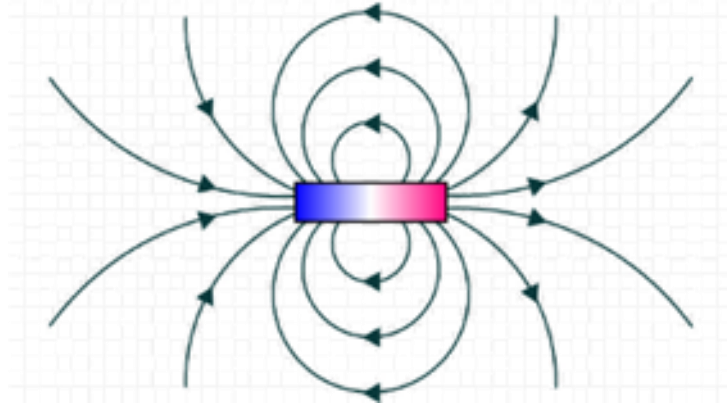


Figura 19. Representación de campo magnético producido por un imán de barra a través de la líneas de flujo magnético. Tomado de <https://www.freepng.es/png-qnnqxi/>. Imagen de acceso libre

Para representaciones del campo magnético producido por un imán de barra (figura 19) se pueden hacer, a manera de demostraciones, experimentos que permitan ver la distribución de las líneas de campo que se configuran alrededor de dicho imán. En estas demostraciones experimentales se pueden evidenciar las líneas equipotenciales o de flujo magnético en la limadura de hierro o en ferrofluidos.

Para el caso de la estrioscopia Schlieren electrónica el campo magnético se representa a través de un gradiente de intensidades de campo magnético que se evidencia como un cambio en el número de electrones que chocan con la pantalla dependiendo de la distancia a la que estén de la sombra del imán.

Así como el modelo y representación que se presenta tradicionalmente de campo magnéticos (figura 19) se fundamenta en nociones geométricas para su estudio. Los sistemas de estrioscopia Schlieren tienen el potencial de acercar a los estudiantes hacia un entendimiento más intuitivo de como la materia cargada interactúa con los campos magnéticos a través de la geometría, la óptica,

y el electromagnetismo a niveles introductorios. Esto permitiría que los estudiantes logren hacer predicciones mejores y en sistemas más complejos que el campo producido con un imán de barra.

3.4 conclusiones

1. Este trabajo es un análisis teórico de fenómenos aplicables en la práctica con el fin de visualizar campos magnéticos y profundizar sobre cómo la materia cargada interactúa con estos, este modelo teórico hace predicciones sobre la manera en la que se podría construir un prototipo de estrioscopía Schlieren electrónico, además de una predicción para lo que se observaría en dicho sistema y su interpretación física.
2. La evidencia y argumentos que se recogen aquí a propósito de la viabilidad de la estrioscopía Schlieren electrónica sugieren que es posible construir un dispositivo que permita recoger y reconstruir de manera visual información sobre los campos magnéticos usando elementos de bajo costo.
3. Se incentiva que lectores interesados lleven a cabo la construcción del prototipo y que esto permita implementarlo en escenarios educativos y/o de investigación para ampliar el alcance de la estrioscopía Schlieren electrónica.
4. Este trabajo logra ampliar el repertorio de herramientas que los docentes tienen a la hora de enseñar el concepto de campo magnético, permitiendo un entendimiento más intuitivo de la manera en que este interactúa con la materia cargada y de cómo construir herramientas que manipulen materia cargada para estudiar el campo magnético a través de la interacción entre éstos.

Anexos

Anexo 1. Deducción del cambio de velocidad que presenta un electrón al atravesar un campo magnético de forma diferencial.

La primera relación que describe el comportamiento de una partícula cargada que se mueve por un campo magnético es

$$\vec{F} = Q(\vec{v} \times \vec{B}) \quad 1$$

Llamada como la fuerza de Lorentz, donde Q es la carga de la partícula, en este caso un electrón, v es la velocidad con la que se mueve el electrón por el eje óptico a través del campo magnético y

\vec{B} es el vector de campo en el punto que se encuentra la partícula. Luego podemos reescribir la parte derecha de la ecuación y obtener

$$m\vec{a} = Q(\vec{v} \times \vec{B}) \quad 2$$

Donde m es la masa de la partícula y \vec{a} su aceleración, podemos también decir que

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = Q(\vec{v} \times \vec{B}) \quad 3$$

Si despejamos el término de la velocidad obtenemos

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{Q}{m} (\vec{v} \times \vec{B}) \quad 4$$

En donde se entiende que el cambio de velocidad producido por el movimiento de la partícula a través de un campo magnético depende de la relación carga-masa de esta. Ahora bien, al considerar un campo magnético que solo tiene gradiente en una dirección, podemos decir que la magnitud de la velocidad será constante en el tiempo. Sin embargo, la dirección del vector velocidad si va a cambiar, de aquí podemos deducir que

$$\frac{d\vec{v}}{dz} = \frac{Q}{m} \left(\vec{v}_x \times \frac{d\vec{B}}{dy} \right) \quad 5$$

Debido a que la razón de cambio de la velocidad respecto al tiempo es cero podemos definir el cambio de dirección de la trayectoria del electrón como una razón de cambio con respecto a un eje perpendicular tanto al de movimiento del electrón como al eje óptico.

Referencias

- *Amrita Mazmudar. (2011). Principles and techniques of Schlieren imaging systems. Estados Unidos: Columbia University.*
- *Andrew Davidhazy. (2006). Introduction to shadowgraph and Shlieren imaging. Estados Unidos: Rochester Institute of Technology.*
- *Carola Hernández H., Ruby Yaya E. (2000). Una propuesta constructivista para la enseñanza de la física. Colombia: Voces y Silencios, Vol. 1, No. 1. 53-68*
- *David Williams, Barry Carter. (2009). Transmission electron microscopy. Estados Unidos: Springer link.*

- *Departamento di Scienze e Tecnologie Biologiche ed Ambientali. (2014). Eelectromagnetic lenses. Italia: Università del Salento.*
- *Gary Settles. (2001). Schlieren and shadowgraph techniques. Estados Unidos: Penn state university.*
- *M. M. Ayala, F. Malagón y P. Lugo (1995). Una perspectiva fenomenológica para la enseñanza del electromagnetismo a nivel introductorio. Universidad Pedagógica Nacional Santa Fe de Bogotá.*
- *María Elena Rodríguez Pérez, Antonio Lara-Barragán Gómez, Guillermo Cerpa Cortés. (2017). La enseñanza del electromagnetismo: Una experiencia dentro del modelo de competencias integradas de la universidad de Guadalajara. México: Universidad Nacional Autónoma de México.*
- *Ministerio de Educación Nacional. (2004). Estándares básicos de competencias en ciencias naturales y ciencias sociales. Colombia: Ministerio de educación nacional.*
- *Montilla, E. K. (2007). Una nueva visión del constructivismo para la enseñanza de la física en la época actual. Góndola, enseñanza y aprendizaje de las ciencias, 2(1), 37–41.*
- *Norma Constanza Castaño, Guillermo Chona Duarte, Francia María Cabrera Castro, Judith Arteta De Molina Valencia, Steyner Vargas, Pablo Antonio Bonilla. (2018). Lo que nos dice la historia de la enseñanza de la biología en Colombia, Una aproximación. Colombia: Universidad Pedagógica Nacional.*
- *Peter Hawkes, Erwin Kasper. (2017). Principles of electron optics. Estados Unidos: Academic press.*
- *Saul Dushman. (1930). Thermionic emission. Estados Unidos: Reviews of modern physics.*

- *Valdez Alejandro Francisco Javier. (2012). Teorías educativas y su relación con las tecnologías de la información y de la comunicación (TIC). México: Universidad Nacional Autónoma de México.*