

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Física

Segundo semestre de 2022

Profesor Ernesto Montero Zeledón

Práctica #3.1.

Experimentos con lentes divergentes y convergentes¹

La Práctica #3 está dividida en dos partes, en la primera se realizan experimentos de laboratorio para comprobar los efectos de la formación de imágenes utilizando lentes delgadas divergentes y convergentes, mientras que en la segunda se utilizan simulaciones computacionales para aplicar los conceptos de la formación de imágenes en estas lentes.

Objetivo general:

Realizar experimentos sencillos y ensayos por simulación computacional para comprender los principios de la formación de imágenes en lentes delgadas divergentes y convergentes.

Objetivos específicos:

1. Realizar experimentos para comprobar la formación de imágenes utilizando una lente biconvexa o convergente.
2. Determinar experimentalmente la distancia focal de una lente convergente, mediante la formación de imágenes, y de una lente divergente, mediante un sistema de lentes.
3. Determinar la curvatura de una lente convergente y una lente divergente, mediante la ecuación del fabricante de lentes.

Introducción

Cuando pensamos en una lente delgada quizás nos venga a la mente las lentes del padre, de la abuela, o la lupa con las que jugábamos de niños. Pero ¿a qué se debe ese poder de atracción, casi mágico, de modificar lo que vemos a través de ellas? Pues como se verá en el curso de Óptica, el poder de las lentes se debe al fenómeno de la refracción de la luz. La refracción de la luz es conocida desde hace miles de años, pues los antiguos griegos la conocían, pero no lograron explicarla. La refracción de la luz se produce cotidianamente en objetos parcialmente sumergidos en el agua o cuando se aprecian detrás de recipientes de vidrio.

Este fenómeno fue estudiado teóricamente por los científicos árabes Ibn Sahl en el siglo X [1], cuando estudiaba la forma de producir dispositivos mecánicos que reprodujeran las secciones cónicas, e Ibn al-Haytam en el siglo XI [2], conocido en Europa como Alhacén, cuando buscaba explicar el funcionamiento de la córnea humana y los espejos esféricos. Sin embargo, fue cuando se tradujeron al latín los libros de Alhacén, que se produjo un auge de la óptica y de sus aplicaciones en los monasterios europeos durante las siguientes décadas. Se acostumbra a afirmar que la primera lente de aumento fue producida por Roger Bacon cerca de 1250. Sin embargo, la evidencia

¹ Guía elaborada por el profesor Ernesto Montero Zeledón

documental indica que, hacia el final del siglo XIII, fue cuando los monjes europeos lograron producir las primeras lentes para lectura, hechas de cuarzo [2] (Figura 1).

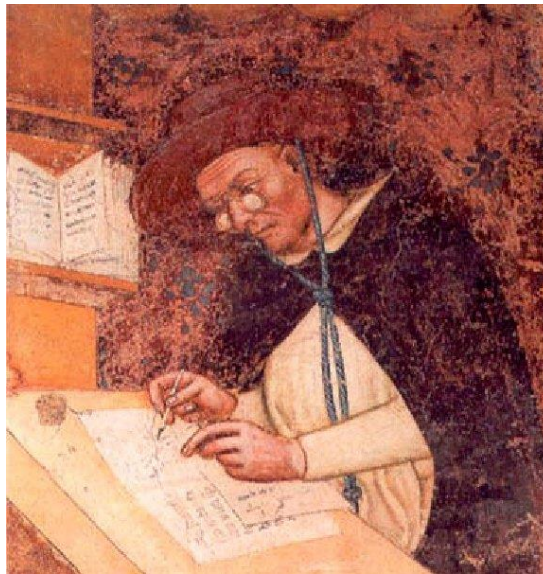


Figura 1. Primer retrato de un hombre con gafas en 1352. Cardenal Hugo de Provence de Tomasso da Modena, Iglesia de San Nicolás de Treviso, Italia [3].

Sin embargo, es probable que el fenómeno de las “piedras de aumento”, como se llamaban las primeras lentes de aumento, se conociera accidentalmente desde antes, pues el vidrio era un material conocido ampliamente desde la época romana. El vidrio fue sin duda, el primer material sólido transparente cuya forma final podía ser controlada por el hombre. Los primeros objetos de vidrio datan del tercer milenio antes de Cristo y fueron encontrados en distintas zonas de Asia Menor, Mesopotamia y Egipto. El principal uso que los romanos dieron a este material fue para almacenar aceites y perfumes, pero también para elaborar objetos decorativos, ceremoniales y religiosos.

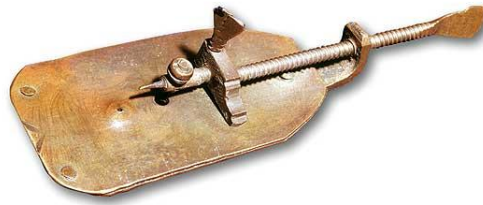
Las primeras catedrales con vitrales se construyeron en el siglo X en Alemania, en ellas ya se nota un gran dominio técnico en la fabricación de vidrio, pues ya se podía fabricar láminas planas translúcidas de diferentes colores. Es de suponer que las primeras lentes pudieran surgir de manera accidental como residuos de la fabricación de objetos de vidrio.

Entre los años de 1590 y 1608, los holandeses Hans Jansen y Hans Lippershey construyeron el primer microscopio compuesto [4], pero la calidad de la imagen no permitía más de 10 aumentos. En 1610, el gran científico italiano Galileo Galilei, construyó una versión mejorada del telescopio refractor descubierto en Holanda pocos años antes. Galileo fue el primer científico en utilizar este instrumento con fines astronómicos. Sin embargo, cerca del 1675 el holandés Van Leeuwenhoek, un comerciante con inclinaciones científicas, halló la manera de generar lentes de calidad óptica con mucho aumento con las que realizó observaciones científicas notables (Figura 2). A partir de sus estudios, logró encontrar vida microscópica desconocida en gotas de agua, observó la circulación de la sangre en la cola de una anguila y pudo distinguir los espermatozoides en el semen de un

perro. Se estima que el microscopio de lente simple de Van Leeuwenhoek pudo generar imágenes de 200 aumentos, una magnificación semejante a la de los microscopios actuales.



(a)



(b)

Figura 2. (a) Retrato de Anton Van Leeuwenhoek, (b) Microscopio construido por Van Leeuwenhoek.

En 1783 el norteamericano Anderson Smith patentó las lentes bifocales, pero fue Benjamin Franklin quién se hizo famoso por dicho invento, pues escribió sobre su propio diseño en 1784 [5], luego de comprobar que con los lentes rotos de sus gafas anteriores se podían construir nuevas gafas funcionales con dos distancias focales diferentes.

Como hemos visto, la combinación de varias lentes en un mismo eje óptico permitió el desarrollo de nuevos instrumentos como el microscopio compuesto y el telescopio refractor. Ambos desarrollos permitieron el acceso a nuevos y desconocidos mundos, por una parte, un microcosmos poblado por infinidad de seres y partículas diminutas y, por otro, un macrocosmos poblado por un número de estrellas mucho mayor que el observado a simple vista y una mayor variedad de objetos y fenómenos celestes. En la actualidad, estas dos innovaciones tecnológicas continúan siendo fundamentales en la generación de nuevo conocimiento y en el desarrollo de nuevas disciplinas: microbiología y exobiología, microelectrónica, geología planetaria y astrofísica, por mencionar unas pocas. Es probable que todavía haya nuevas disciplinas, nuevos descubrimientos e instrumentos de investigación que se generen como resultado de este conocimiento y de las investigaciones aplicadas realizadas por las nuevas generaciones de ingenieros y físicos.

Existe una ecuación, llamada la ecuación del fabricante de lentes, que permite relacionar la distancia focal de la lente (f) con los dos radios de curvatura de las caras de la lente (R_1 y R_2). Asimismo, esta ecuación considera los índices de refracción de la lente (n_{lente}) y del medio que rodea la lente (n_{medio}), que habitualmente se toma como aire ($n_{aire} = 1$) [6]:

$$\frac{1}{f} = \frac{n_{lente} - n_{medio}}{n_{medio}} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (\text{Ec. 3.1-1})$$

Recuerde también que la distancia focal se relaciona con la distancia al objeto (s_o) y la distancia a la imagen (s_i) producida por la lente, que es la misma ecuación de los espejos esféricos:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{s_i} + \frac{1}{s_o} \quad (\text{Ec. 3.1-2})$$

Si dos lentes delgadas coaxiales están en contacto (una al lado de la otra), la distancia focal del sistema compuesto se puede aproximar con la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{f_{sist}} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} \quad (\text{Ec. 3.1-3})$$

Mediante esta ecuación es posible determinar la distancia focal de lentes divergentes utilizando una lente compuesta, la cual tendría que estar formada por una lente convergente y una lente divergente de mayor distancia focal, es decir, una lente tal que $|f_{div}| > |f_{conv}|$.

Trabajo de los estudiantes

En la introducción de su informe de la Práctica #3, sobre lentes delgadas convergentes y divergentes, debe revisar los siguientes temas para redactar un solo marco teórico que integre los temas. Recuerde que la introducción se debe escribir en prosa y en tercera persona del singular:

1. Explique brevemente la importancia de las lentes en los instrumentos modernos de medición y en la tecnología actual.
2. Explique brevemente el funcionamiento del microscopio y del telescopio. Comente si es posible producir uno de estos instrumentos de forma casera.
3. Brinde las definiciones de los conceptos de distancia focal, eje óptico de una lente, haces paraxiales y sistema coaxial de lentes.
4. En el caso de sistemas de lentes acopladas, ¿es posible definir una distancia focal del sistema compuesto de lentes (lente compuesta)?
5. Explore y exponga brevemente cómo se fabrican las lentes convergentes y divergentes.
6. Cuáles son los materiales más utilizados en la fabricación de lentes para equipos ópticos.

Equipo requerido

Estas prácticas están basadas en la experiencia del profesor y en las guías de laboratorio elaboradas por la Facultad de Matemáticas, Astronomía y Física de la Universidad Nacional de Córdoba [5], Argentina, y por la Escuela de Física de la Universidad de Costa Rica [6]. Para realizar esta práctica es necesario que cada equipo de estudiantes disponga de los materiales que se describen en la Tabla 1. Para guiar a los estudiantes se brinda una descripción del propósito de los materiales que se utilizarán para realizar los experimentos, por si debe realizar alguna adaptación del experimento.

Tabla 1. Materiales para la ejecución de las experiencias.

Material	Propósito
Conjunto de lentes planas “Ray Optics Demonstration Set”	Analizar la convergencia y divergencia de haces paraxiales producida por lentes divergentes o convergentes.
Dispositivo láser de cinco rayos rojos paralelos con transformador eléctrico	Producir haces paralelos de luz láser para el estudio del fenómeno de convergencia y divergencia de la luz al usar lentes delgadas.
Tres lentes con distancias focales +300 mm, +50 mm y – 100 mm.	Determinar la distancia focal de las lentes facilitadas
Fuente de luz (foco o candelabro)	Para producir las imágenes a través de la lente

Cartulina o papel blanco	Se utiliza como pantalla para proyectar las imágenes
Soportes para sostener la fuente, la lupa y pantalla, alineados sobre un eje	Si los distintos elementos del sistema se pueden sostener en posiciones fijas es más fácil realizar las mediciones de distancias
Vernier, regla y cinta métrica	Para medición de las dimensiones de las lentes y las posiciones de los objetos y las imágenes
Cámara fotográfica o teléfono celular	Tomar fotografías

Procedimiento

A. *Propiedades de la lentes convergentes y divergentes*

1. Mediante el juego de lentes planas y luz láser de cinco haces, compruebe de forma experimental las propiedades de las lentes convergentes y divergentes. Para ello, coloque la fuente de luz láser de modo que sus haces incidan paraxialmente al eje óptico de las lentes planas convergentes y divergentes del juego de lentes.
2. Con ayuda de la lente semicircular del conjunto de lentes, compruebe el fenómeno de la aberración esférica de los haces paraxiales.
3. Tome fotografías de los fenómenos ópticos observados de modo que se aprecie la trayectoria de los haces paraxiales, de los puntos focales y de los haces divergentes.

B. *Distancia focal de una lente convergente por medición directa usando fuente de luz lejana*

1. Tome las lentes biconvexas que se brindan en el laboratorio (pueden servir una lente de ocular, de telescopio refractor o de una lupa) y colóquela en un soporte de la lente que se haya facilitado en el laboratorio.
2. Utilice una ventana o puerta del laboratorio para identificar un objeto lejano (10 m o más) que se encuentre fuera y que sirva como fuente luminosa. Recuerde que cuanto más distante el objeto lejano, mejor. Como objeto distante puede utilizar un árbol, un edificio, las nubes o una montaña. También puede utilizar una lámpara o un foco que estén a suficiente distancia.
3. Luego enfoque el objeto con su lente sobre una pantalla, para lo cual puede utilizar una cartulina blanca plana o una hoja de papel, colocada en un soporte que la mantenga perpendicular al eje óptico. Coloque alineados los tres elementos: objeto lejano, lente y la imagen sobre el papel.
4. Una vez que están alineados todos los elementos y colocados sobre al eje óptico, enfoque lo mejor que pueda el objeto lejano sobre la pantalla, moviéndola hacia adelante o hacia atrás hasta que se aprecie con nitidez la imagen del objeto. Luego mida la distancia de la lente a la pantalla (s_i), anotando este resultado.
5. Compruebe que la lente biconvexa se comporta como una lente de aumento para objetos colocados a una distancia menor de la distancia focal. Y que, para distancias iguales o mayores a la distancia focal, la imagen se aprecia distorsionada, desenfocada o invertida.

C. *Distancia focal de una lente por medición indirecta utilizando una fuente de luz cercana*

1. Para cada una de las lentes convergentes facilitadas por el profesor, realice el montaje de la fuente luminosa, la lente (cada una por aparte) y la pantalla alineados en el eje óptico de

la lente, como se muestra en la Figura 3. Como fuente luminosa puede utilizar un foco, una lámpara o una vela (no sirve un láser).

2. La distancia de separación inicial entre la fuente y la pantalla ($s_o + s_i$), debe ser entre tres y cuatro veces la longitud focal determinada en la parte anterior. Por ejemplo, si la distancia focal de la lente es 150 mm, entonces $s_o + s_i$ puede estar inicialmente entre 450 mm y 600 mm, dependiendo del espacio disponible en la mesa del laboratorio.
3. Ajuste la posición de la lente, que se halla en medio de la fuente y la pantalla, de modo que se obtenga una imagen nítida sobre la pantalla. Mida las distancias s_o y s_i , para anotarlas en su tabla de resultados.
4. Posteriormente, aleje entre 6 cm y 8 cm la fuente de la pantalla (también puede alejar la pantalla de la fuente esa distancia) y ajuste la posición de la lente hasta que se produzca una nueva imagen nítida. Una vez definida la nueva posición de la lente mida las distancias s_o y s_i , y anótelas.
5. Repita el paso anterior para obtener un total de cinco pares de datos de s_o y s_i , luego de cuatro alejamientos sucesivos entre la fuente y la pantalla.

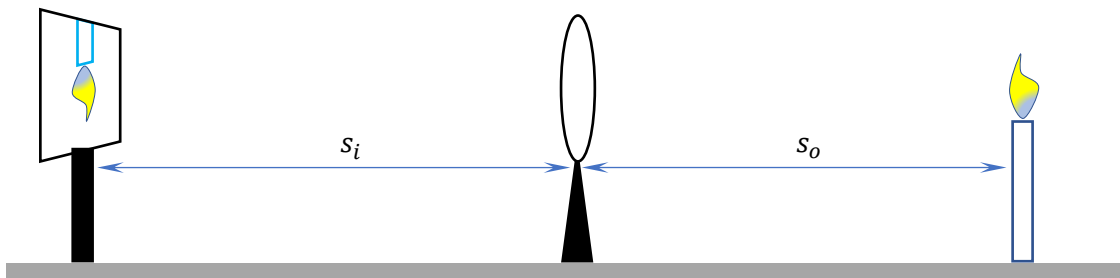


Figura 3. Montaje experimental de la fuente, la lente y la pantalla, alineados.

D. Determinación de la distancia focal de una lente divergente

1. Para realizar esta experiencia debe utilizar un sistema compuesto de dos lentes, una convergente y otra divergente, tal que $|f_{div}| > |f_{conv}|$. Las dos lentes se deben colocar lo más cerca posible y realizar el mismo experimento que el realizado con lentes convergentes (partes B y C del procedimiento), con el fin de determinar la distancia focal de sistema compuesto.
2. Primero se determina la distancia focal mediante medición directa enfocando un objeto lejano y luego se utiliza una fuente cercana y una pantalla de proyección para determinar el conjunto de valores s_o y s_i que producen una imagen enfocada.

E. Determinación de la distancia focal de una lente divergente. Método alternativo²

1. Otro método que se puede utilizar para determinar la distancia focal de una lente divergente es utilizando haces paraxiales al eje óptico de la lente (Figura 3).
2. Utilizando dos haces paraxiales distintos, se debe marcar en un papel o cartulina la distancia de separación entre los haces antes y después de pasar por la lente y, junto con las dimensiones del sistema, generar la proyección que permita determinar el punto donde se

² Método para la determinación de la distancia focal de lentes divergentes, propuesto por el profesor Dennis Murillo.

cruzan los haces divergentes de modo que se pueda estimar la posición del punto de confluencia, es decir, el punto focal.

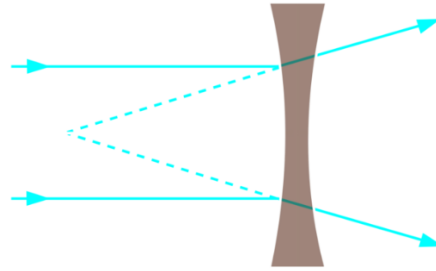


Figura 3. Haces paraxiales cruzando una lente divergente.

F. Determinación de la curvatura e índice de refracción de las lentes

1. Determine las dimensiones de la lente delgada convergente (diámetro y grosor) y divergente (diámetro, grosor en el borde y el centro) utilizando un vernier, de la manera más precisa que pueda. Tome fotografías de la lente en posición frontal y de canto, si fuera posible.

IMPORTANTE: Recuerde que es conveniente tomar fotografías de sus experimentos para luego incorporarlas en el informe. Es recomendable que en algunas fotografías aparezcan usted y sus compañeros, para guardar un registro histórico de sus cursos.

Análisis de resultados

A. Análisis de las propiedades de las lentes convergentes y divergentes

1. Compare sus resultados con las predicciones teóricas de los libros de texto que incluyan el tema de óptica geométrica. Incluya sus fotografías para describir las propiedades de las lentes convergentes y divergentes, así como el eje óptico, la posición del foco y la distancia focal.

B. Análisis de la distancia focal de una lente convergente por medición directa

1. Como la distancia de la lente al objeto es mucho más grande, entonces la segunda ecuación de la introducción, indica que dicha distancia (s_i) es igual a la distancia focal de la lente (f), pues el término ($1/s_o$) tiene un valor despreciable, cercano a cero.
2. Determine la distancia focal de cada lente y estime de la manera más razonable que pueda el valor de la incertidumbre de su determinación, pero sin recurrir al desarrollo de todos los pasos previos. Comente con sus compañeros de equipo su estimación y corríjala si lo consideran conveniente.
3. Tomando como correcto el valor nominal de la distancia focal de cada lente, determine el porcentaje de error de su determinación.

C. Análisis de distancia focal de una lente convergente utilizando una fuente cercana

1. Utilizando el mismo cambio de variable propuesto para la Práctica #2.2 de este curso, determine la distancia focal de la lente mediante el método de regresión lineal por mínimos cuadrados.
2. Estime de una manera aproximada la incertidumbre de la medición de la distancia focal.

3. Una vez obtenida la distancia focal, compare el resultado con la distancia focal obtenida en la parte anterior y con la distancia focal nominal, que se tomará como la correcta.

D. Análisis de la determinación de la distancia focal de una lente divergente

1. Se puede determinar la distancia focal del sistema de lentes mediante el experimento descrito en la parte B del procedimiento, utilizando una fuente de luz alejada.
2. Cuando se utiliza una fuente cercana, se puede utilizar el método de regresión lineal para determinar la distancia focal del sistema compuesto de dos lentes divergente-convergente, partiendo de un cambio de variable de las mediciones de s_o y s_i .
3. Una vez determinada la distancia focal por estos dos métodos, se debe determinar la distancia focal de la lente divergente, utilizando la ecuación 3.1-3, expuesta en la parte introductoria.
4. Es conveniente comparar estos resultados con la distancia focal nominal de la lente divergente, mediante un porcentaje de error, tomando como correcto el valor nominal.

G. Análisis de la distancia focal de una lente divergente. Método alternativo³

1. Se pueden obtener las dimensiones y posiciones de los haces y la lente de forma directa, pero también, se pueden obtener a partir de imágenes fotográficas de los haces proyectados, que incluyan una regla en la imagen. Posteriormente, comuna imagen impresa de la fotografía o con ayuda de un software gratuito de procesamiento de imágenes, como Fiji (<https://fiji.sc/>) o ImageJ2 (<https://imagej.net/software/imagej2/>), se pueden medir las dimensiones de los objetos en la fotografía.
2. A partir de las dimensiones de la lente, el eje óptico y el punto focal, es posible determinar la distancia focal de la lente divergente.
3. Estima de manera aproximada, pero razonable, la incertidumbre de su determinación.

H. Análisis de la curvatura y grosor de las lentes

1. A partir del diámetro de las lentes y de su grosor, determine por la geometría del casquete esférico, el radio curvatura de las caras de la lente convergente y divergente, considerando que ambas caras de la lente tienen el mismo radio de curvatura.
2. Luego, tomando como distancia focal correcta, la distancia nominal de cada lente, determine el índice de refracción de la lente estudiada con ayuda de la ecuación 3.1-1.
3. Estime, mediante algún método aproximado (no requiere un método preciso), la incertidumbre en el valor del índice de refracción encontrado.
4. Identifique el material o los posibles materiales de los que están hechos las lentes consultando los índices de refracción que aparecen en la literatura (libros de texto, manuales de propiedades ópticas, página web confiable, etc.) y valore si su identificación es razonable.
5. Comente si el método utilizado para medir la curvatura es bueno y mencione cómo lo podría mejorar.

³ Método para la determinación de la distancia focal de lentes divergentes, propuesto por el profesor Dennis Murillo.

Bibliografía

- [1] Chandler, R. "The Anatomy of an Objective Lens". Olympus Discovery Blog. Recuperado el 22 de agosto de 2021: <https://www.olympus-lifescience.com/en/discovery/the-anatomy-of-an-objective-lens/>
- [2] Getty Images. iStock. Recuperado el 22 de agosto de 2021: <https://www.istockphoto.com/es/search/2/image?phrase=cross+section+of+a+camera+lens>
- [3] Wikipedia. "Archivo: Tipos de lentes". Recuperado el 23 de agosto de 2021: https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Tipos_de_Lentes.svg
- [4] Young, H.; Freedman, R. & Ford, A. "Física universitaria de Sears y Zemansky". Vol. 2. Decimotercera Edición, Editorial Pearson, 2014.
- [5] Fa.M.A.F. "Física General IV: Óptica. Práctica de Laboratorio N°3: Lentes Delgadas". Guía de laboratorio creada en 2005. Recuperado el 22 de agosto de 2021: <https://www.famaf.unc.edu.ar/~pury/famaf.gui/optlabs/guia03/index.html>
- [6] Madrigal Roldán, Gustavo. "Formación de imágenes en Espejos y Lentes Esféricos". Laboratorio de Física General III (FS0411), Escuela de Física, Universidad de Costa Rica, 2020.