

Práctica 5

Diseño Óptico

Luis Arturo Ureña Casarrubias
José Antonio Aguilar Ibarra

Laboratorio de Óptica

26 de octubre de 2024

Resumen

Durante el desarrollo de las leyes de reflexión y refracción a través de superficies curvas, específicamente en superficies esféricas, se emplean aproximaciones *paraxiales* y despreciando el grosor de las lentes que refractan la luz. La aproximación paraxial consiste en únicamente considerar los *rayos paraxiales*, es decir, aquellos que forman ángulos pequeños con el eje central del sistema óptico formador de imágenes (Pedrotti et al., 2020). Usando las consecuencias de estas aproximaciones se puede determinar la configuración del sistema óptico para crear una imagen en una ubicación ideal; sin embargo, en la práctica las imágenes obtenidas no son ideales por efecto de la dispersión de la luz, aberraciones y difracción. En este trabajo nos enfocaremos en el último tipo de defectos ópticos.

1. Introducción

Explorar los principios de diseño óptico utilizando lentes simples y analizar aberraciones y formación de imágenes mediante el software **Oslo**. El enfoque se centra en la optimización de la posición de la imagen y la reducción de aberraciones ópticas a través del análisis de curvas de intercepción de rayos y diagramas de manchas (Spot Diagram).

$$\sin \theta = \theta - \frac{\theta^3}{3!} + \frac{\theta^5}{5!} + \dots, \quad (2.1)$$

en la ley de Snell $n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t$, obteniendo en la aproximación paraxial $n_i \theta_i = n_t \theta_t$. La teoría de tercer orden consiste en emplear los dos primeros términos de (2.1).

Las aberraciones se dividen en dos tipos:

- **Cromáticas:** estas son provocadas por la dependencia del índice de refracción de la luz en un material en la longitud de onda.
- **Monocromáticas:** estas se presentan incluso cuando la luz considerada consiste en una sola longitud de onda, es decir, que es monocromática. Dentro de las monocromáticas están aquellas que detienen la imagen “volviéndola confusa” y aquellas que *deforman la imagen* (Hecht, 2000).

2.1. Aberración Cromática

Cuando se usa una luz policromática, los rayos con distintas longitudes de onda λ (de distintos colores) recorren el sistema óptico con diferentes trayectorias. Esto se ve a primera aproximación en la ecuación de lentes delgadas.

$$\frac{1}{f(\lambda)} = (n_l(\lambda) - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right).$$

Por lo general $n_l(\lambda)$ es una función decreciente de λ en la región visible de la luz. Por lo tanto $f(\lambda)$ es una función creciente en el mismo régimen. Esto a su vez lleva a que se forman imágenes del mismo objeto pero de distintos colores en distintos puntos del eje óptico. Esto se ilustra en la figura 1 y es conocido como *aberración cromática axial*.

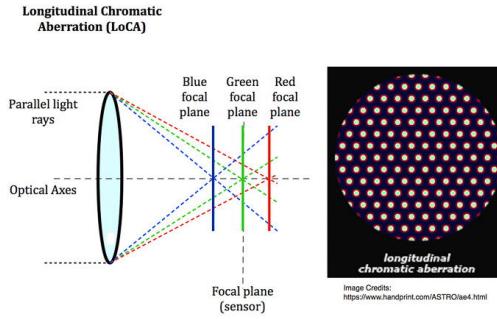


Figura 1: La lente proyecta una imagen real con un halo de distintos colores, que se forma al enfocarse los distintos colores en distintos planos. Imagen tomada de <https://expertphotography.com/chromatic-aberration-photography>.

En la aberración cromática anterior se consideraron rayos paralelos. En la aberración cromática *lateral* puntos del objeto fuera del eje son enfocados en distintos puntos fuera del eje nuevamente de acuerdo a su color.

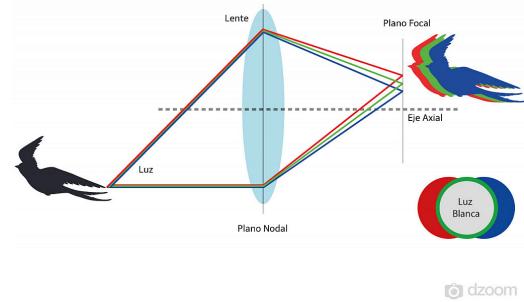


Figura 2: Los colores de un punto fuera del eje forman imágenes desfasadas. Imagen tomada de <https://www.dzoom.org.es/wp-content/uploads/2020/03/aberracion-transversal-lateral-e-jemplo-grafico-v4-1024x613.jpg>.

2.2. Aberración Monocromática

Para una superficie refractiva esférica se puede deducir la siguiente relación entre los focos conjugados para un rayo de luz que pasa de un medio con índice de refracción n_1 a uno con índice n_2 .

$$\frac{n_1}{\ell_o} + \frac{n_2}{\ell_i} = \frac{1}{R} \left(\frac{n_2 s_i}{\ell_i} - \frac{n_1 s_o}{\ell_o} \right), \quad (2.2)$$

donde

$$\ell_o = \sqrt{R^2 + (s_o + R)^2 - 2R(s_o + R) \cos \phi},$$

$$\ell_i = \sqrt{R^2 + (s_i + R)^2 - 2R(s_i - R) \cos \phi}.$$

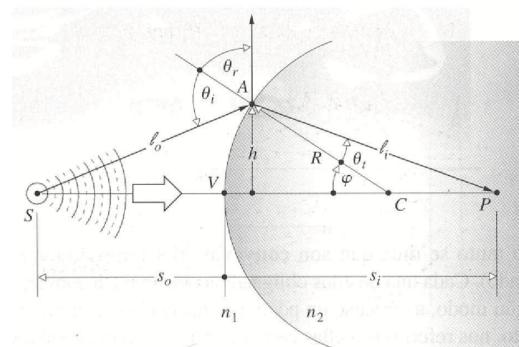


Figura 3: Refracción de un rayo en una superficie esférica. Imagen tomada de (Hecht, 2000).

En la aproximación paraxial o de primer orden $\ell_o \approx s_o$ y $\ell_i \approx s_i$ y la ecuación (2.2) se reduce a

$$\frac{n_1}{\ell_o} + \frac{n_2}{\ell_i} = \frac{n_2 - n_1}{R}.$$

Pero en la aproximación de tercer orden en el lado derecho de la expresión anterior aparece el término adicional

$$h^2 \left[\frac{n_1}{2s_o} \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{s_o} \right)^2 + \frac{n_2}{2s_i} \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{s_i} \right)^2 \right].$$

Este término adicional provoca que los rayos que se alejan del eje óptico son enfocados más cerca del vértice, como se muestra en la siguiente figura.

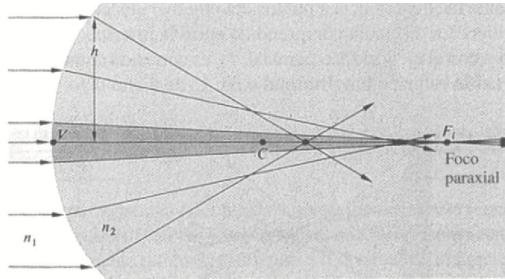


Figura 4: Aberración en una superficie esférica. Imagen tomada de (Hecht, 2000).

La coma es una aberración asociada con la distancia del eje óptico de los puntos donde los rayos atraviesan la lente.

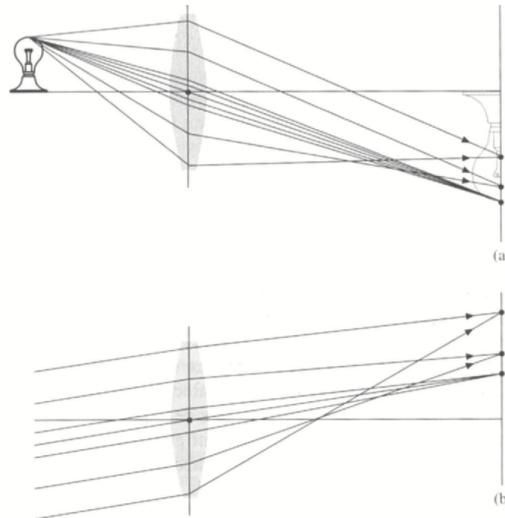


Figura 5: Dependiendo de dónde atraviesen los rayos a la lente estos son enfocados a distintas distancias del eje. Imagen tomada de (Hecht, 2000).

En el astigmatismo, a diferencia de las dos aberraciones anteriores, solo involucra rayos

originados de una misma fuente que está fuera del eje óptico y es originada por la proyección de dos rayos que se transmiten en planos perpendiculares. El cono de luz que forman los rayos es enfocado en dos puntos distintos, correspondientes a los dos planos perpendiculares *sagital* y *meridional*.

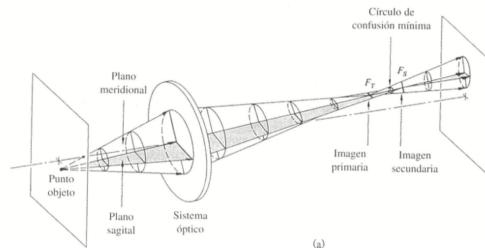


Figura 6: De una fuente puntual fuera del eje óptico está fuera del eje óptico se forma un cono de luz asimétrico sobre la lente. Imagen tomada de (Hecht, 2000).

3. Metodología Experimental

Paso 1: Selección de la Lente

1. Se seleccionó una lente **plano-convexa** del catálogo en **Oslo EDU**.
2. En el menú de **Surface Data**, se configuraron los parámetros de la lente, incluyendo el radio de curvatura y el grosor, con el objetivo de analizar sus características.

Paso 2: Análisis en Surface Data

1. Se revisaron los valores de **Radio de Curvatura (RADIUS)**, **Grosor (THICKNESS)** y **Material (GLASS)** en cada superficie.
2. El índice de refracción del vidrio BK7 (aproximadamente 1.5168) se usó típicamente para la longitud de onda de 587.6 nm.

Paso 3: Optimización de la Posición de la Imagen

1. La posición del objeto se configuró en infinito para simular rayos de luz paralelos.
2. El software se ajustó para buscar la posición óptima de la imagen utilizando la opción **Solved** en **Surface Data**.

Paso 4: Análisis de Curvas de Intercepción de Rayos

1. Se utilizó la herramienta **Ray Intercept Curves Analysis** para visualizar la dispersión de los rayos en el plano imagen.
2. Se observó la presencia de aberraciones ópticas, clave para comprender el comportamiento de la lente.

Paso 5: Reducción del Radio del Haz de Entrada

1. Se redujo el radio del haz de entrada de 9.000000 a 4.000000 en el menú **Setup**.
2. Al recalcular las **Ray Intercept Curves**, se observó una reducción en las aberraciones debido a la limitación de rayos periféricos.

Paso 6: Análisis con Lente Plano-Convexa y su Inversión

1. Se generó el **Spot Diagram** con el objeto en infinito, observando el tamaño de la mancha en el plano imagen.
2. Se invirtieron las superficies de la lente intercambiando los valores de radio de curvatura.
3. Al repetir el **Spot Diagram**, se observó un aumento en el tamaño de la mancha, indicando una disminución en la calidad de la imagen.

4. Resultados

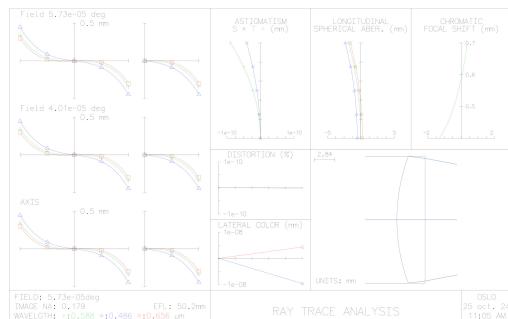


Figura 7

En esta imagen el análisis de Surface Data de la lente seleccionada, se observaron los parámetros clave: radio de curvatura, grosor y material de la lente. La lente está compuesta por vidrio BK7 con un índice de refracción de aproximadamente 1.5168 a 587.6 nm. El análisis de estos datos permite configurar la lente de manera óptima para las simulaciones posteriores.

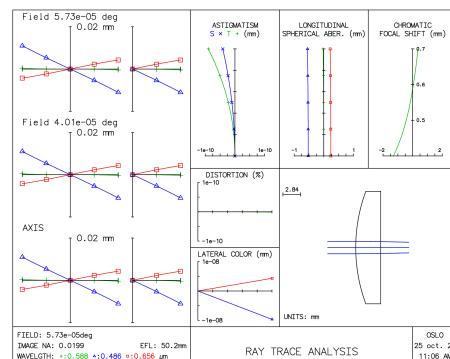


Figura 8

En la imagen se observa la posición del objeto se colocó en infinito ($1.00000e+20$) para simular rayos paralelos incidentes en la lente. Luego, se utilizó la opción Solved en Oslo para optimizar la posición de la imagen. Esta configuración nos permitió simular cómo se comportan los rayos paralelos en la formación de imágenes, y evaluar el efecto de la lente sobre la convergencia de los rayos.

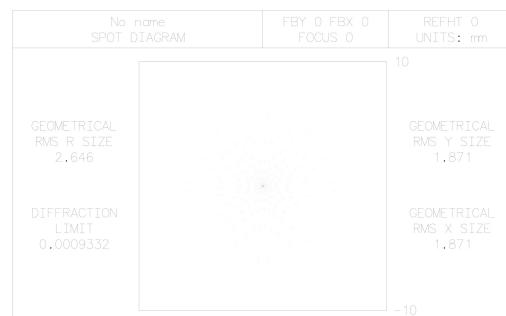


Figura 9

En esta imagen, el radio del haz de luz de entrada se redujo de 9.000000 a 4.000000 para observar cómo afecta esta reducción a la calidad de la imagen. Los resultados en las Ray Intercept Curves muestran que al limitar el tamaño

del haz, se minimizan las aberraciones producidas por los rayos periféricos, mejorando la nitidez de la imagen y reduciendo distorsiones.

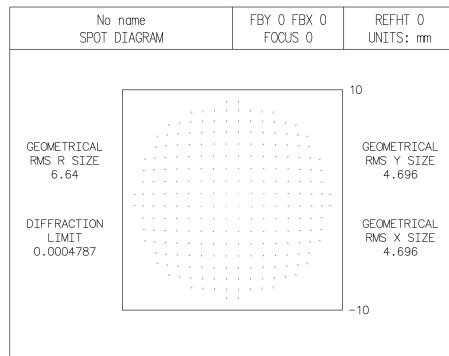


Figura 10

Se generó el Spot Diagram con el objeto en infinito y la lente orientada en su posición original. En esta configuración, se observó que el tamaño de la mancha (círculo de confusión) era menor, lo cual indica una mejor calidad de imagen. Al invertir las superficies de la lente (cam-

biando la orientación de la parte convexa hacia el objeto), el Spot Diagram mostró un aumento en el tamaño de la mancha, lo que indica que la imagen se volvió menos nítida debido al incremento de aberraciones ópticas. Este análisis muestra cómo la orientación de la lente afecta directamente la formación de la imagen, y que la orientación inicial era la más adecuada para minimizar aberraciones y mejorar la calidad.

5. Conclusiones

Este experimento nos mostró de manera práctica cómo la configuración de una lente afecta la calidad de la imagen. Al ajustar la orientación y el radio del haz de entrada en la lente plano-convexa, pudimos ver claramente cómo estos cambios reducen las aberraciones y mejoran la nitidez. Usar Oslo fue clave para visualizar estos efectos y entender mejor la teoría óptica aplicada, mostrando cómo pequeños ajustes en el diseño pueden hacer una gran diferencia en la precisión de los sistemas ópticos.

Referencias

- Hecht, E. (2000). *Optics* (3rd). Addison Wesley.
 Pedrotti, F. L., Pedrotti, L. S., & Pedrotti, L. M. (2020). *Introduction to Optics* (3rd). Cambridge University Press. <https://www.cambridge.org/core/books/introduction-to-optics/>