



**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA
NACIONAL**

Educadora de educadores

**Defectos refractivos (miopía, hipermetropía y astigmatismo)
desde la óptica geométrica, una experiencia de aprendizaje
activo con un grupo de estudiantes del tópico de óptica física de
la Universidad Pedagógica Nacional.**

TRABAJO DE GRADO PRESENTADO POR VÍCTOR RAMÍREZ PARA OBTENER EL
GRADO DE LICENCIADO EN FÍSICA


Asesores: M.Sc. Juan Gabriel Martínez y M.Sc. Yesid Cruz

Línea de Investigación: La enseñanza de la física a partir de la relación Física y
Matemática

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
LICENCIATURA EN FÍSICA

BOGOTÁ D.C


2018

 UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL <small>ANEXOS 2012-10-10-2012</small>	FORMATO	
	RESUMEN ANALÍTICO EN EDUCACIÓN - RAE	
Código: FOR020GIB	Versión: 01	
Fecha de Aprobación: 10-10-2012	Página 1 de 5	

1. Información General	
Tipo de documento	Trabajo de grado
Acceso al documento	Universidad Pedagógica Nacional. Biblioteca Central
Título del documento	<i>Defectos refractivos (miopía, hipermetropía y astigmatismo) desde la óptica geométrica, una experiencia de aprendizaje activo con un grupo de estudiantes del tópico óptica física de la Universidad Pedagógica Nacional</i>
Autor(es)	Ramírez Moyano, Víctor Alfonso
Director	Martínez, Juan Gabriel y Cruz Bonilla, Yesid Javier
Publicación	Bogotá. Universidad Pedagógica Nacional, 2017. 62p.
Unidad Patrocinante	Universidad Pedagógica Nacional
Palabras Claves	DEFECTOS REFRACTIVOS, ABERRACIONES ÓPTICAS, POLINOMIOS DE ZERNIKE, APRENDIZAJE ACTIVO.

2. Descripción
<p>El siguiente trabajo de grado está dirigido a la población estudiantil universitaria, con la finalidad de afianzar sus conocimientos, sobre los defectos de refracción (miope, hipermetropía y astigmatismo) a partir de la óptica geométrica y el uso de las lentes divergentes y convergentes para la corregir dichos defectos, adicionalmente se empleó las aberraciones ópticas y la representación de un frente de desde los polinomios de Zernike dándole el trabajo una relación fisicomatemática, por otra parte se diseña un módulo el cual es implementado en un grupo de óptica física en la Universidad Pedagógica Nacional, dicho modulo fue realizado desde el aprendizaje activo donde el estudiante genera conocimiento de forma activa. Finalmente, con el trabajo de grado se busca contribuir a la enseñanza de la física a partir de la óptica geométrica, generando espacios donde el estudiante pueda comprender lo fenómenos de la vision y como estos pueden ser explicados desde la física.</p>

3. Fuentes
<p>[Aristizábal and Restrepo, 2012] Aristizábal, D. and Restrepo, R. (2012). Notas sobre física de oscilaciones ondas y óptica.</p> <p>[Artal et al., 2002a] Artal, P., Fernández, E. J., and Manzanera, S. (2002a). Are optical aberrations during accommodation a significant problem for refractive surgery? <i>Journal of refractive surgery</i>, 18(5):S563–S566.</p> <p>[Artal et al., 2002b] Artal, P., Fernández, E. J., and Manzanera, S. (2002b). Are optical aberrations during accommodation a significant problem for refractive surgery? <i>Journal of refractive surgery</i>, 18(5):S563–S566.</p> <p>[Atchison et al., 2000] Atchison, D. A., Smith, G., and Smith, G. (2000). <i>Optics of the human eye</i>.</p> <p>[Barbosa, 2011] Barbosa, Y. M. (2011). El frente de onda y su representación con polinomios de Zernike. <i>Ciencia & Tecnología para la Salud Visual y Ocular</i>, 9(2):145–166.</p> <p>[Barbosa, 2012] Barbosa, Y. M. (2012). La prueba de Hartmann en ciencias de la visión. <i>Ciencia & Tecnología para</i></p>

 UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL <small>ANEXO 2012-10-2012</small>	FORMATO	
	RESUMEN ANALÍTICO EN EDUCACIÓN - RAE	
Código: FOR020GIB	Versión: 01	
Fecha de Aprobación: 10-10-2012	Página 2 de 5	

la Salud Visual y Ocular, 10(1):149–165.

[Benegas et al., 2010] Benegas, J., Zavala, G., Gangoso, A. G., and Truyol, M. E. (2010). Reporte del 3er. taller regional del cono sur sobre aprendizaje activo: Mecánica (Córdoba 2010) y la 3ra. Conferencia regional del cono sur sobre aprendizaje activo de la física (craaf-3). Lat. Am. J. Phys. Educ. Vol, 4(3):776.

[Benito, 1998] Benito, J. V. S. (1998). Manual de óptica geométrica. Editorial Club universitario. 6 18 [Cantalapiedra and Palacio, 1997] Cantalapiedra, I. R. and Palacio, A. M. L. (1997). Apuntes de Física I de Topografía: óptica geométrica. EUPB. 7, 8

[Carnicer González and Juvells Prades, 2003] Carnicer González, A. and Juvells Prades, I. (2003). Apuntes de óptica física. 5, 6 [Cornejo Rodríguez and Urcid Serrano, 2006] Cornejo Rodríguez, A. and Urcid Serrano, G. (2006). Óptica geométrica resumen de conceptos y formulas parte i. Technical report, INAOE. 5 [de Souza Oliveira Filho, 2011] de Souza Oliveira Filho, K. (2011). Teoría das aberraciones ópticas.

[Dorronsoro et al., 2003] Dorronsoro, C., Barbero, S., Llorente, L., and Marcos, S. (2003). On-eye measurement of optical performance of rigid gas permeable contact lenses based on ocular and corneal aberrometry. Optometry & Vision Science, 80(2):115–125.

[Fernández and Fernández, 2001] Fernández, G. T. and Fernández, M. T. (2001). Errores refractivos y sus implicaciones genéticas.

[Figueras Atienza, 2013] Figueras Atienza, M. (2013). Óptica geométrica La óptica sin ondas. Universitat Oberta de Catalunya. [Gil, 2010] Gil, C. I. G. (2010). Construcción de un sensor de frente de onda tipo shack-hartmann empleando dos tipos de arreglos de lentes.

[Gómez, 2010] Gómez, J. (2010). Apoyo para la preparación de los estudios de ingeniería y arquitectura @ONLINE.

[Gómez González, 2006] Gómez González, E. (2006). Guía básica de conceptos de óptica geométrica. 5, 8

[González, 2017] González, J. T. B. (2017). Polinomios de Zernike para el estudio de la aberración de superficies. Tesis, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

[Guzmán Martín et al., 2008] Guzmán Martín, A., Hernández Vidal, M. J., Martínez, M., Martínez Trinidad, M., and Noguera Moltó, C. (2008). Comisión de oftalmología medicina 2007/08. 19

[Hake, 2007] Hake, R. (2007). Six lessons from the physics education reform effort. Latin American Journal of Physics Education, 1(1):24–31.


[Hecht, 2002] Hecht, E. (2002). Optics. Addison-Wesley. 6 [Laws, 2008] Laws, P. W. (2008). A lens into the world. AAPT Interactions, 38(1):20–23.

[Liang et al., 1994] Liang, J., Grimm, B., Goetz, S., and Bille, J. F. (1994). Objective measurement of wave aberrations of the human eye with the use of a Hartmann–shack wave-front sensor. JOSA A, 11(7):1949–1957.

[Mahajan, 1998] Mahajan, V. N. (1998). Optical Imaging and Aberrations: Ray Geometrical Optics, volume 45. SPIE press.

[Malacara, 2007] Malacara, D. (2007). Optical shop testing, volume 59. John Wiley & Sons.

[Marín, 2006] Marín, M. C. P. (2006). Óptica Fisiológica: el sistema óptico del ojo y la visión binocular. Madrid. M

 UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL <small>ANEXO 2012-10-2012</small>	FORMATO	
	RESUMEN ANALÍTICO EN EDUCACIÓN - RAE	
Código: FOR020GIB	Versión: 01	
Fecha de Aprobación: 10-10-2012	Página 3 de 5	

Cinta Puell Marín es profesora titular del departamento de Óptica II (Optometría y Visión) de la Universidad Complutense.

[Mochón, 2007] Mochón, J. F. C. (2007). Estudio de las aberraciones oculares y su corrección mediante lentes de contacto hidrofílicas en ojos normales y muy aberrados. Universidad de Murcia.

[nALVER; BEATRIZ PLÁ, 2014] nALVER; BEATRIZ PLÁ, C. A. S. D. M. A. N. M. B. P. (2014). El ojo humano y sus defectos.

[Olarte, 2011] Olarte, R. V. (2011). Entendiendo e interpretando las aberraciones ópticas. Ciencia & Tecnología para la Salud Visual y Ocular, 9(2):105–122.

[Orozco Martínez, 2012] Orozco Martínez, J. (2012). El aprendizaje activo de la física en los cursos en línea del ipn. Revista Mexicana de Bachillerato a Distancia, 4(7).

[Ramírez-Gómez and Monroy-Ramírez, 2013] Ramírez-Gómez, C. and Monroy-Ramírez, F. A. (2013). Alop-active learning in optics and photonics-a unesco's program spreading in Colombia through the national university. In Education and Training in Optics and Photonics, page EWP4. Optical Society of America. 20

[Sierra Gómez, 2013] Sierra Gómez, H. (2013). Aprendizaje activo como mejora de las actitudes de los estudiantes hacia el aprendizaje.

[Sokoloff, 2006] Sokoloff, D. R. (2006). ACTIVE LEARNING IN OPTICS AND PHOTONICS. TRAINING MANUAL. UNESCO, 1 edition.

[Sokoloff and Thornton, 1997] Sokoloff, D. R. and Thornton, R. K. (1997). Using interactive lecture demonstrations to create an active learning environment. In AIP Conference Proceedings, volume 399, pages 1061–1074. AIP.

[Thibos et al., 2002] Thibos, L. N., Applegate, R. A., Schwiegerling, J. T., and Webb, R. (2002). Standards for reporting the optical aberrations of eyes. Journal of refractive surgery, 18(5):S652–S660.

[Tomás, 2014] Tomás, J. (2014). Aberrometría ocular: aplicaciones clínicas y limitaciones de los sensores de frente de onda. Ciencia y Tecnología para la Salud Visual y Ocular, pages 93–105.


[Vieyra and Hernández, 2006] Vieyra, A. G. and Hernández, D. M. (2006). Reconstrucción de frentes de onda con datos interferométricos utilizando polinomios de cuasi-Zernike. mathesis, Centro de investigaciones en óptica.

[Wilson, 2014] Wilson, L. O. (2014). Anderson and krathwohl-bloom's taxonomy revised: Understanding the new version of bloom's taxonomy. Erisim tarihi, 13.

[Young et al., 2009] Young, H., Sears, F., Freedman, R., Zemansky, M., Ford, A., Brito, J., Flores, V., and Leal, R. (2009). Física universitaria con física moderna 12ED. Volumen II. Number v. 2 in Física universitaria. Pearson Educación. 7

4. Contenidos

En el primer capítulo se tratan las bases de la óptica geométrica, índice de refracción, camino óptico, el principio de Fermat y su relación con el camino óptico, ley de la reflexión y la refracción, lentes y la construcción de imagen en

 UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL <small>ANEXO 10 - 2012</small>	FORMATO	
	RESUMEN ANALÍTICO EN EDUCACIÓN - RAE	
Código: FOR020GIB	Versión: 01	
Fecha de Aprobación: 10-10-2012	Página 4 de 5	

lentes delgadas.

En el segundo capítulo se tiene en cuenta los defectos de refracción (miopía, hipermetropía y astigmatismo), y se describe cada defecto de refracción en el globo ocular y su corrección con el uso de lentes divergentes y convergentes.

En el capítulo tres se tienen las aberraciones ópticas, el sensor de Hartmann-Shack, definición de un frente de onda y representación de un frente de onda desde los polinomios de Zernike.


Por último se tienen el cuarto capítulo donde se presenta una estrategia de aula desde el aprendizaje activo, donde se realiza un módulo, el cual se implantó en un curso de óptica física de la Universidad Pedagógica Nacional, la finalidad de dicho módulo fue la de hacer que el estudiante genere conocimiento de manera activa sobre los defectos de refracción. Para esto se utilizó el banco óptico, lentes divergentes y convergentes. Adicionalmente, se contó con un test el cual midió el conocimiento de los estudiantes obtenido en la parte experimental.

5. Metodología

Se toma la metodología documental, ya que como su nombre lo dice es apoyada en fuentes de carácter documental, de esta manera el trabajo de grado está soportado por referentes bibliográficos, libros y artículos los cuales están basados en temas de óptica geométrica, fisiología del globo ocular, aberraciones ópticas, los polinomios de Zernike y el aprendizaje activo. Teniendo en cuenta estos referentes se hace un análisis para la explicación de los defectos refractivos en el globo ocular y se realiza la construcción de un módulo que es implementado, dicho módulo cuenta con dos partes experimental y conceptual haciendo que el trabajo realizado en el aula tenga como finalidad afianzar los conocimientos de los estudiantes a partir de lo anterior se tienen en cuenta dos aspectos que son muy importantes para la realización de este trabajo los cuales son:

- Hacer una revisión de las fuentes y referencias conceptuales para así poder abordar los temas que se llevarán a cabo en la realización del trabajo,
- Que el estudiante tenga en cuenta el fenómeno de la visión y sepa que cuando existe un defecto de refracción, qué tipo de lente debe usar para su corrección, así tenga en cuenta los procesos que ha venido realizando en el aula para que tenga una descripción más detallada del tema.

Cabe resaltar que el módulo fue implementado en un grupo de óptica física, donde este se convierte en un referente más permitiendo la construcción de conocimiento por parte de los estudiantes activamente haciendo que su aprendizaje sea más significativo.

 UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL <small>ANEXO 27 - 2018</small>	FORMATO		
	RESUMEN ANALÍTICO EN EDUCACIÓN - RAE		
Código: FOR020GIB	Versión: 01		
Fecha de Aprobación: 10-10-2012	Página 5 de 5		

6. Conclusiones
<ul style="list-style-type: none"> • Al hacer la relación de la óptica geométrica con el sistema visual en este caso el ojo humano, se desarrolla una temática fisicomatemática que implica a plantear y explica brevemente las bases de la óptica geométrica, y los tipos de lentes que se utilizan para estudiar la trayectoria de la luz. Dicha trayectoria es percibida por el globo ocular como un rayo luminoso que forma la imagen de manera correcta en la retina. Pero el ojo humano está propenso a defectos de refracción. A partir de lo anterior se tiene en cuenta la miopía, la hipermetropía y el astigmatismo como defectos de refracción primarios, los cuales son la razón para la realización de este trabajo de grado que está dirigido a la población estudiantil y que tiene como objetivo de explicar los fenómenos de refracción que suceden en la visión. • Se empleó una descripción teórica la cual hace una relación entre la óptica geométrica y los defectos de refracción, para que así el lector pueda tener una mayor comprensión sobre el tema entendiendo como los rayos de luz llegan a un ojo emétrope, es decir, que esté libre de defectos, cuando incide en un ojo amétrope. • También entenderá como se puede hacer la corrección por medio de las lentes divergentes y convergentes, las cuales hacen que al llegar la luz en el ojo se pose sobre la retina y no por delante ni por detrás de ella, dependiendo del defecto se hace uso de las lentes puede ser negativa o positiva. • De acuerdo con los razonamientos que se han venido realizando se tienen las aberraciones ópticas las cuales describen un frente de onda que pasa por un sistema óptico, siendo paralelo al plano principal, pero al no cumplirse esta norma se generan un frente de onda aberrado, por lo tanto se hace una representación de un frente de onda desde los polinomios de Zernike, donde el lector podrá obtener conocimiento a profundidad sobre el tema. <p>Se empleó la metodología del aprendizaje activo de la física, mostrando una de las tantas maneras de enseñanza de la física, en la que el estudiante avanza en su aprendizaje de forma autónoma, participa activamente en el proceso de formación educativa y promueve el desarrollo de sus ideas previas. Como docente en formación, para mí es satisfactorio haber realizado este trabajo de grado ya que puedo aportar conceptos que son poco enseñados en la universidad.</p>

Elaborado por:	Ramírez Moyano, Víctor Alfonso
Revisado por:	Martínez, Juan Gabriel y Cruz Bonilla, Yesid Javier

Fecha de elaboración del Resumen:	27	01	2018
--	----	----	------

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al creador por hacer que este pensar se haya hecho realidad. Aunque fue un camino duro, siempre persistí para llegar a estas instancias y culminar mi carrera. También agradezco a mi mamá que siempre estuvo desde el inicio dándome apoyo y moral para seguir adelante, a mis hermanos Ricardo, Erika y Yamile quienes me han colaborado para que esto se haga realidad. Agradezco a mi gran amigo Jorge Aljure quien siempre estuvo en mis momentos débiles y me colaboró con su conocimiento para seguir en la universidad, aunque ya no esté con nosotros, jamás olvidaré sus palabras.

Por otra parte, agradezco inmensamente a mi asesor de tesis el profesor Juan Gabriel Martínez, quien ha estado en este proceso, con su paciencia y tolerancia ha hecho que este trabajo de grado sea posible. También agradezco a mis amigos de la universidad John Acosta, Paula Cardona y Camilo Ayala quienes estuvieron conmigo en las buenas y en las malas. A mis compañeros de química, biología, Artes visuales entre otras licenciaturas quienes me apoyaron cada viernes con la compra de mis productos. A los compañeros de la chazas quienes fueron muy serviciales. También agradezco a mis amigos de toda la vida Jean Paul Romero, Carlos Ballen, Harrison Loaiza, Reinel Romero, David Arango, Jeison Rios y Diana Muñoz los cuales siempre me apoyaron en este proceso. Quiero agradecer a Lorena García quien siempre me colaboró y aportó sus conocimientos para que fuese una mejor persona. Agradezco especialmente a mi Sharol Salgado quien ha estado apoyando, dándome ánimos y acompañando mis trasnochadas para terminar este trabajo siendo una gran persona en mi vida y espero lo siga siendo, agradezco inmensamente a mi abuelita Maria Otilia Mayor que ya no está con nosotros pero siempre me apoyó en todo sin importar nada, por último, agradezco a todas aquellas personas que confiaron y me apoyaron para que finalizara mi licenciatura.

Índice general

Lista de Figuras	III
Resumen	1
Introducción	1
1. Óptica Geométrica	5
1.1. Bases de la óptica geométrica	5
1.1.1. Índice de refracción	6
1.1.2. Camino óptico	6
1.1.3. El principio de Fermat y su relación con el camino óptico	7
1.1.4. Ley de la reflexión y refracción.	8
1.1.5. Lentes	16
1.1.6. Construcción de imágenes en una lente delgada.	18
2. Modelamiento del ojo humano desde la óptica geométrica.	21
2.0.1. Descripción del sistema ocular desde la óptica geométrica	22
2.0.2. Defectos Refractivos Ametropías En El Globo Ocular (Miopía, Hipermetropía y astigmatismo)	25
2.0.3. Miopía	25
2.0.4. Hipermetropía	27
2.0.5. Astigmatismo	29
3. Aberraciones ópticas y la representación de un frente de onda desde los polinomios de Zernike.	32
3.0.1. Aberraciones en el globo ocular	32

3.0.2. El sensor de Harmann-Shack como medición de las aberraciones oculares.	38
3.0.3. Definice de un frente de onda.	42
3.0.4. Representación de un frente de onda desde los polinomios de Zernike.	46
4. El aprendizaje activo como metodología de enseñanza para la construc- ción e implementación de un módulo, en un grupo de estudiantes del tópico física óptica en la Universidad Pedagógica Nacional.	50
4.1. ¿Qué es el aprendizaje activo?	50
4.1.1. Aprendizaje Activo de la física	52
4.1.2. Diseño del módulo a implementar	54
4.1.3. Reflexiones finales	57
Conclusiones	59
A. Anexo: Módulo	62
Bibliografía	67

Índice de figuras

1.1. Trayectoria que toma un haz de luz al pasar a través de una secuencia de medios estratificados con distintos índices de refracción. Imagen tomada de [Cornejo Rodríguez, 2006].	7
1.2. En la figura de la izquierda se muestra la curva C que recorre la luz en un medio heterogéneo entre los puntos A y B para definir el camino óptico. En la figura de la derecha, se indican las probables trayectorias C_M y $C_{M'}$ entre los puntos A y B próximas a C con valor estacionario para el camino óptico [Cornejo Rodríguez, 2006].	8
1.3. Posibles trayectorias que puede seguir la luz para ir desde un foco ubicado en el punto A al punto B después de reflejarse en el espejo E	9
1.4. Trayectoria seguida por un rayo para ir del punto A al punto B después de reflejarse en un espejo E	9
1.5. Puntos recorridos por la luz.	11
1.6. El paso de la luz de un medio a otro con índice mayor.	12
1.7. El paso de la luz de un medio a otro con índice menor.	13
1.8. Se crea una imagen donde se fijan cada punto emitido por el objeto los cuales entrar al sistema óptico, y al traspasarlo cada haz que proviene de un punto se encontraran en un punto.	14
1.9. Imagen virtual en un sistema óptico.	15
1.10. Lente de vidrio delimitado por dos superficies esféricas.	16
1.11. Lentes divergentes y convergentes.	17
1.12. Lentes biconvexa y plano-cóncavas o lentes positivas $f \geq 0$. Imagen tomada de [Cornejo Rodríguez, 2006]	18

1.13. Lentes bicóncavas y plano- cóncavas, negativas $f \leq 0$. Imagen tomada de[Cornejo Rodríguez, 2006].	18
1.14. Formación de imagen en una lente delgada.	19
2.1. Fisionomía del ojo humano.[Benito, 1998]	22
2.2. El cristalino cambia su forma para dar la acomodación.	23
2.3. Posición del foco imagen en el ojo miope.	26
2.4. Posición del foco imagen en el ojo hipermetrope.	28
2.5. Se observa el defecto refractivo y su corrección con una lente cilíndrica.	30
3.1. El paso de un frente de onda plano por las microlentes[Olarte, 2011]	33
3.2. Ojo sin aberración y ojo con aberración[Dorronsoro et al., 2003].	34
3.3. Aberraciones constantes fuente estándar[Thibos et al., 2002]	36
3.4. Aberraciones de bajo orden[Thibos et al., 2002]	36
3.5. Aberraciones de alto orden [Thibos et al., 2002].	37
3.6. Grafica tridimensional a color de los polinomios de Zernike y la ubicación de cada polinomio Fuente[de Souza Oliveira Filho, 2011][de Souza Oliveira Filho, 2011].	38
3.7. Descripción de los tres montajes en la prueba de Hartmann: (a) rectangular, (b) radial y (c) helicoidal.	39
3.8. Presentación de un esquema básico de Hartmann el cual mide las aberraciones en un espejo astronómico	40
3.9. Puntos de referencia generados por el patrón de Hartmann (círculos) y (cruces). Donde la distorsión local de la superficie de prueba es medida por el corrimiento dado por los puntos y la posición por medio del patrón de referencia esto es llamada aberración de rayo.	41
3.10. Se mide el frete de onda que emerge por medio de un modelamiento del globo ocular consiste en una fuente puntual lumínica en la retina, el frente de onda que se produce del modelamiento del ojo humano es muestreado el montaje de lentes y el plano del sensor de la CCD se produce un patrón de Hartmann, con el cual se puede hacer la reconstrucción de un frente de onda.	42

3.11. la organización exacta de los spots lumínicos con relación a un frente de onda plano el cual está libre de aberraciones[Tomás, 2014]	43
3.12. Rayos de luz emitidos por una fuente puntual donde se observa un frente de onda, imagen tomada de [Mejía, 2011].	44
3.13. Rayos de luz emitidos por una fuente puntual y un frente de onda para el caso de un medio material no homogéneo. Imagen tomada de[Mejía, 2011].	45
3.14. Los polinomios de Zernike y su descripción hasta el cuarto orden [Mochón, 2007]	48
4.1. Comparación entre los entornos educativos: Aprendizaje pasivo y Aprendizaje activo [Orozco Martínez, 2012]	53
4.2. Desarrollo del montaje experimental	55
4.3. Análisis del montaje experimental.	55
4.4. Desarrollo de la parte teórica.	56
4.5. Desarrollo de la parte teórica.	57

Resumen

El siguiente trabajo es el resultado de una revisión y estudio sobre defectos de refracción del ojo humano, específicamente, miopía, hipermetropía y astigmatismo. En el escrito se definen claramente dos componentes: una de tipo disciplinar y la otra pedagógica. En la componente disciplinar se introducen los fundamentos de la óptica geométrica, el concepto de rayo luminoso y se modela el ojo humano como un sistema óptico a fin de lograr una explicación de los defectos refractivos y sus correcciones. Posteriormente, se consideran las aberraciones en términos del frente de onda y de los polinomios de Zernike, lo que permite representar matemáticamente cualquier aberración óptica y evaluar de manera práctica la calidad de la visión. Finalmente, en la componente pedagógica se reporta la implementación de un módulo a estudiantes del tópico Óptica Física de la Universidad Pedagógica Nacional, fundamentado en el aprendizaje activo de la física.

Palabras clave: Defectos refractivos, aberraciones ópticas, polinomios de Zernike, aprendizaje activo.

Introducción

Al hacer una reflexión sobre el fenómeno de la visión, se identifica que son pocas las oportunidades en las que se piensa sobre cuál es el mecanismo que permite que al abrir los ojos se vean los objetos inmediatamente. No se consideran los diferentes factores, procesos o interacciones que forman parte del proceso de la visión, por ejemplo: ¿cuál es el intervalo de tiempo transcurrido desde que se abren los ojos, se ve lo que está fuera y se interpreta? Las explicaciones para el fenómeno de la visión se dan desde la interacción de la luz con los objetos.

A partir de lo anterior se hace una explicación al proceso y funcionamiento de la visión teniendo en cuenta los siguientes aspectos: en el momento que llega la luz al ojo pasa primero por una membrana llamada cornea, con forma de lente menisco divergente y curva respecto al radio del globo ocular. Sigue al humor acuoso en el que se generan algunas refracciones importantes, luego traspasa el cristalino, siendo esta una lente biconvexa convergente. Posteriormente, alcanza al humor vítreo y finaliza su recorrido en la retina, donde se forman las imágenes percibidas.

El proceso anterior se produce cuando el ojo está en óptimas condiciones. Si por el contrario, se presenta algún tipo de ametropía o defecto de refracción como la miopía, la hipermetropía o el astigmatismo, los rayos de luz no llegan correctamente a la retina haciendo que las imágenes se generen por delante o por detrás de ésta, produciendo una limitación visual. Existen correcciones con lentes divergentes y convergentes que mejoran la agudeza visual y que comúnmente se utilizan en gafas y lentes de contacto, entre otros.

Dentro de los defectos refractivos se puede nombrar la miopía, que se caracteriza porque los rayos de luz al llegar al ojo convergen delante de la retina, haciendo que la imagen formada de un objeto ubicado a una gran distancia, sea borrosa. Así, un ojo miope, solo puede enfocar objetos que se encuentran a distancias cercanas. Por el contrario, la hipermetropía genera que los objetos a distancias lejanas sean percibidos por el ojo de manera correcta, pero los que son enfocados a una corta distancia se observen de forma borrosa. Lo anterior, es consecuencia de una retina sin la suficiente curvatura y por lo tanto, los rayos de luz emitidos por los objetos forman una imagen detrás de la retina.

Por consiguiente, se hace una relación entre el fenómeno de la visión y los defectos de refracción desde la óptica geométrica; una rama de la física que describe la propagación de la luz en diferentes medios materiales y los fenómenos de la reflexión y refracción en un sistema óptico. En este orden de ideas, en el primer capítulo se presentan los fundamentos de la óptica geométrica, especialmente, se trata el concepto de rayo, el índice de refracción, el camino óptico, ley de la reflexión y refracción, sistema óptico, lentes y construcción de imágenes en lentes delgadas, todo esto para definir la formación de imágenes en un sistema óptico.

En el segundo capítulo, se describe la fisionomía del ojo humano mencionando las partes fundamentales, también se hace una representación del sistema ocular desde la óptica geométrica. Finalmente, se habla sobre los defectos de refracción del globo ocular: miopía, hipermetropía y astigmatismo. Se abordan sus causas y correcciones por medio de las lentes divergentes y convergentes.

En el capítulo tres se hace una descripción del sensor de Hartmann que permite medir las aberraciones ópticas y se introducen los polinomios de Zernike que posibilitan describir matemáticamente un frente de onda aberrado y en consecuencia, estudiar los defectos refractivos.

Por último, en el capítulo cuatro se aborda el aprendizaje activo como estrategia de aula y se reporta la implementación de un módulo dirigido a los estudiantes del tópico de Óptica Física, ofrecido en el Departamento de Física de la Universidad Pedagógica

Nacional. El módulo tiene como finalidad enseñar a los estudiantes la importancia de la óptica geométrica y la relación que se encuentra con la formación de imágenes en el globo ocular. Adicionalmente, se busca que el estudiante comprenda qué son los defectos refractivos, cómo se generan y qué posibilita su corrección.

Capítulo 1

Óptica Geométrica

La óptica geométrica es una parte de la óptica que describe la propagación de la luz y la formación de imágenes. En ésta, se consideran las ondas luminosas como rayos que se mueven a lo largo de líneas rectas entre dos puntos de un material transparente y homogéneo, respondiendo a la ley de Snell cuando experimentan un cambio de medio [Figueras Atienza, 2013]. Si bien, en la óptica geométrica el concepto de rayo representa la trayectoria de la luz, un rayo no es un ente físico, sino un modelo matemático que indica la dirección de flujo de energía radiante de una onda luminosa [Hecht, 2002]. Al hacer uso del concepto de rayo se emplea la geometría para estudiar la reflexión y la refracción de la luz en superficies de formas variadas y la formación de imágenes producidas por diferentes sistemas ópticos [Cornejo Rodríguez, 2006]. La validez de la óptica geométrica está condicionada a que los objetos con los que interacciona la luz a su paso tengan unas dimensiones mucho mayores comparadas con su longitud de onda. Bajo estas condiciones, no se toman en cuenta los fenómenos de interferencia y difracción [Lipson et al., 2010].

1.1. Bases de la óptica geométrica

A continuación se abordarán las bases de la óptica geométrica, haciendo un énfasis especial en el índice de refracción de un material, en el concepto de camino óptico, las leyes de la reflexión y la refracción y finalmente, la formación de imágenes por lentes delgadas.

1.1.1. Índice de refracción

Las características ópticas de un medio se pueden determinar por el índice de refracción (n) de un material o medio transparente, definido en como el cociente entre la rapidez de la luz en el vacío (c) y la rapidez de la luz en el material (v):

$$n = \frac{c}{v} \quad (1.1)$$

Si el medio es homogéneo e isotrópico, el índice de refracción n es el mismo en cualquier parte del material y no depende de la dirección de propagación de la luz [Goodman, 2010]. De otro modo, si el medio es heterogéneo (inhomogéneo), el índice varía con la posición. Si $n = 1$ indica que $v = c$, en general, en diferentes medios materiales $n \geq 1$, por lo que $v \leq c$. El índice de refracción (n) de un medio es adimensional y representa el número de veces que es mayor la rapidez de la luz en el vacío que en ese medio. Por otra parte, el índice de refracción es susceptible a los cambios de temperatura y varía con la longitud de onda de la luz [Aristizábal and Restrepo, 2012].

1.1.2. Camino óptico

La luz sigue diferentes trayectorias al pasar de un medio a otro. Este hecho se puede considerar al tomar una serie k de materiales con índices de refracción n_1, n_2, \dots, n_k y una trayectoria P_0P_k que corta las interfaces en $P_1, P_2, \dots, P_{(k-1)}$, donde P_1, P_2, \dots, P_k se encuentran en los medios de índice n_1, n_2, \dots, n_k , respectivamente, como se muestra en la figura 1.1 [Cornejo Rodríguez, 2006].

Lo anterior, permite introducir el concepto de camino óptico (CO), definido como la distancia óptica, que se expresa a partir de la suma de los productos de los índices de refracción por las distancias recorridas en cada medio. Por lo tanto, el camino óptico se puede escribir como:

$$CO = \overline{(P_0P_1n_1)} + \overline{(P_1P_2n_2)} + \dots + \overline{(P_{k-1}P_kn_k)} = \sum_{i=1}^k \overline{(P_{i-1}P_in_i)} \quad (1.2)$$

Si el material cambia de punto a punto, el camino óptico puede representarse por medio de una integral de línea, como se indica en la ecuación (1.3)

$$CO = \int_A^B n(x, y, z) ds = \int_c nds \quad (1.3)$$

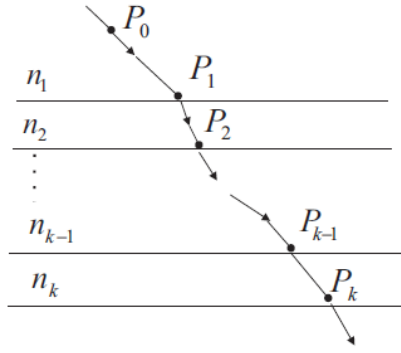


Figura 1.1: Trayectoria que toma un haz de luz al pasar a través de una secuencia de medios estratificados con distintos índices de refracción. Imagen tomada de [Cornejo Rodríguez, 2006].

En el cual $A = P_0$ y $B = P_k$ y ds representa el elemento de longitud de arco sobre la curva C uniendo los extremos A y B entre los materiales. Este tipo de medios se denominan materiales con índice de refracción gradiente [Cornejo Rodríguez, 2006].

1.1.3. El principio de Fermat y su relación con el camino óptico

Al ir la luz de un punto A a un punto B en un medio material heterogéneo con índice de refracción $n(x, y, z)$, debe recorrer una longitud de camino óptico que es estacionaria con respecto a los caminos posibles que unen a A con B [Hecht, 2002]. Dicho de otra manera, si ds corresponde al elemento de arco de la curva C que junta los puntos A y B , el valor numérico, el cual está dado por la integral (1.3), es estacionario [Cornejo Rodríguez, 2006], ver figura 1.2.

Lo anteriormente expuesto puede aclararse suponiendo un rayo de luz que parte del punto A al punto B , siguiendo la curva C . Considerando un punto M diferente de A y de B sobre la curva, al desplazar en alguna dirección el punto M de C una cantidad infinitesimal \overrightarrow{dM} se obtiene una curva C_M , muy cercana a C , con inicio y fin en A y B , respectivamente. De igual manera, tomando un punto M' y desplazándolo una cierta cantidad \overrightarrow{dM}' , se define la curva $C_{M'}$, como se indica en el gráfico de la derecha de la figura 1.2. Si L_{AB} y L'_{AB} son los caminos ópticos a lo largo de C y C_M , respectivamente, se afirma que L_{AB} es un valor estacionario si

$$|L'_{AB} - L_{AB}| \leq c_0 \left| \overrightarrow{dM} \right|^2 \quad (1.4)$$

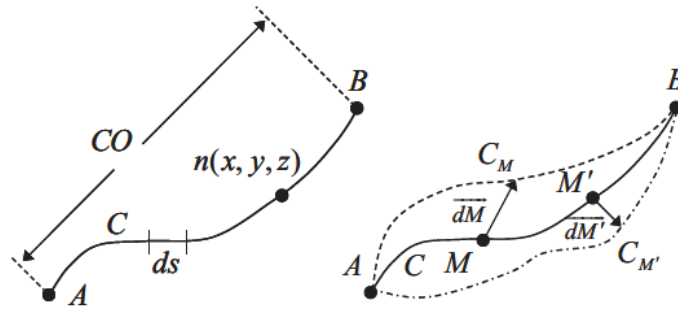


Figura 1.2: En la figura de la izquierda se muestra la curva C que recorre la luz en un medio heterogéneo entre los puntos A y B para definir el camino óptico. En la figura de la derecha, se indican las probables trayectorias C_M y $C_{M'}$ entre los puntos A y B próximas a C con valor estacionario para el camino óptico [Cornejo Rodríguez, 2006].

sólo si $\left| \overrightarrow{dM} \right| \leq \epsilon_0$, siendo c_0 y ϵ_0 constantes positivas. Finalmente, el concepto de valor estacionario, puede implicar un caso de valor mínimo, máximo o constante.

1.1.4. Ley de la reflexión y refracción.

La reflexión y refracción de la luz son dos fenómenos que se observan comúnmente. Por ejemplo, la reflexión de la luz en superficies lisas es la encargada de formar imágenes en espejos, en superficies con agua, superficies limpias y pulidas, etc. Por otra parte, la refracción o desviación de un haz luminoso cuando pasa de un medio transparente a otro, explica la formación de imágenes por medio de lentes.

Ley de la reflexión

El cambio en la dirección de propagación que sufre la luz al incidir en una superficie en general, o sobre un espejo determinado, se denomina reflexión. Sea A un punto en el que se ubica una fuente de luz que emite rayos. De las infinitas trayectorias que puede recorrer un rayo de luz (algunas se muestran en la figura 1.3), para ir desde el punto A al punto B cuando se refleja en el espejo E , aquella en la que el tiempo empleado en recorrerla es máximo, mínimo o estacionario, es la que sigue la luz, de acuerdo con el principio de Fermat. Formalmente, para determinar la trayectoria real de la luz es necesario conocer la forma de la función $t = f(s, s')$ e igualar su primera derivada a cero [Benito, 1998].

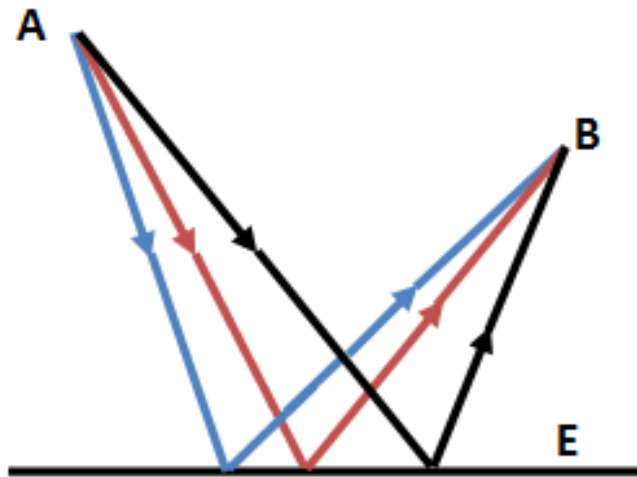


Figura 1.3: Posibles trayectorias que puede seguir la luz para ir desde un foco ubicado en el punto A al punto B después de reflejarse en el espejo E .

El tiempo total t será el resultado del tiempo que toma la luz para recorrer el trayecto AP más el tiempo empleado para recorrer PB , como se puede observar en la figura 1.4,

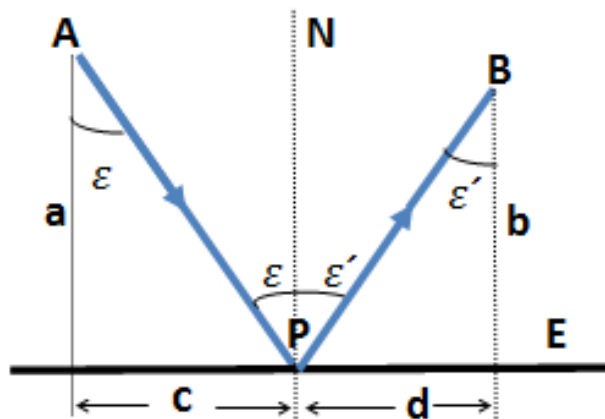


Figura 1.4: Trayectoria seguida por un rayo para ir del punto A al punto B después de reflejarse en un espejo E .

en consecuencia,

$$t = t_{AP} + t_{PB} = \frac{s}{v} + \frac{s'}{v} = \frac{(s + s')}{v} \quad (1.5)$$

donde

$$s = \frac{a}{\cos \varepsilon} \quad \text{y} \quad s' = \frac{b}{\cos \varepsilon'}$$

y v corresponde a la velocidad de la luz en el medio en el que viaja.

Reemplazando s y s' en (1.5) se obtiene:

$$t = \frac{1}{v} \left(\frac{a}{\cos \varepsilon} + \frac{b}{\cos \varepsilon'} \right) \quad (1.6)$$

Si se deriva (1.6) con respecto a ε y se iguala a cero, se tiene como resultado

$$\frac{dt}{d\varepsilon} = \frac{1}{v} \left(\frac{a \cdot \sin \varepsilon}{\cos^2 \varepsilon} + \frac{b \cdot \sin \varepsilon' \frac{d\varepsilon'}{d\varepsilon}}{\cos^2 \varepsilon'} \right) = 0 \rightarrow \frac{a \cdot \sin \varepsilon}{\cos^2 \varepsilon} = -\frac{b \cdot \sin \varepsilon' \frac{d\varepsilon'}{d\varepsilon}}{\cos^2 \varepsilon'} \quad (1.7)$$

Las proyecciones de s y s' son c y d , respectivamente (ver figura 1.4). Dependiendo de la trayectoria que tome el rayo de luz cuando va de A a P y de P a B , los valores de ε y ε' serán diferentes y en consecuencia, los valores de c y d serán distintos. No obstante, la suma de c y d permanecerá constante y su derivada respecto a ε será cero:

$$c + d = \text{constante.}$$

De acuerdo con la figura 1.4,

$$c = a \tan(\varepsilon), \quad y \quad d = b \tan(\varepsilon')$$

y su derivada respecto a ε ,

$$\begin{aligned} \frac{d}{d\varepsilon}(c + d) &= 0 \\ \frac{d}{d\varepsilon}(a \tan(\varepsilon) + b \tan(\varepsilon')) &= 0 \\ a \left(\frac{1}{\cos^2 \varepsilon} \right) + b \left(\frac{1}{\cos^2 \varepsilon'} \right) \frac{d\varepsilon}{d\varepsilon} &= 0 \\ a \left(\frac{1}{\cos^2 \varepsilon} \right) &= -b \left(\frac{1}{\cos^2 \varepsilon'} \right) \frac{d\varepsilon'}{d\varepsilon} \end{aligned} \quad (1.8)$$

Comparando (1.7) y (1.8) se encuentra que $\sin \varepsilon = \sin \varepsilon'$, lo que implica que $\varepsilon = \varepsilon'$. En consecuencia, cuando un rayo parte desde el punto A e incide en un punto P del espejo, el camino que recorre forma un ángulo respecto a la normal de la superficie reflectora (ángulo de incidencia, ε) igual al ángulo formado por el rayo reflejado y la normal (ángulo de reflexión, ε') que va hacia el punto B . Lo anterior se conoce como la primera ley de la reflexión. Por otra parte, la segunda ley de reflexión enuncia que tanto el rayo incidente, la normal y el rayo reflejado están en el mismo plano [Benito, 1998].

Ley de la refracción

Cuando la luz pasa de un medio a otro, altera su velocidad y dirección de propagación. Esta modificación en la dirección de propagación de la luz se denomina refracción. Para encontrar el desplazamiento de la luz cuando se dirige de un punto A localizado en un medio de índice de refracción n a un punto B ubicado en un medio de índice de refracción n' , figura 1.5, se parte del principio de Fermat: la trayectoria seguida por el rayo de luz será aquella en la que se emplee un tiempo máximo, mínimo o estacionario. De esta

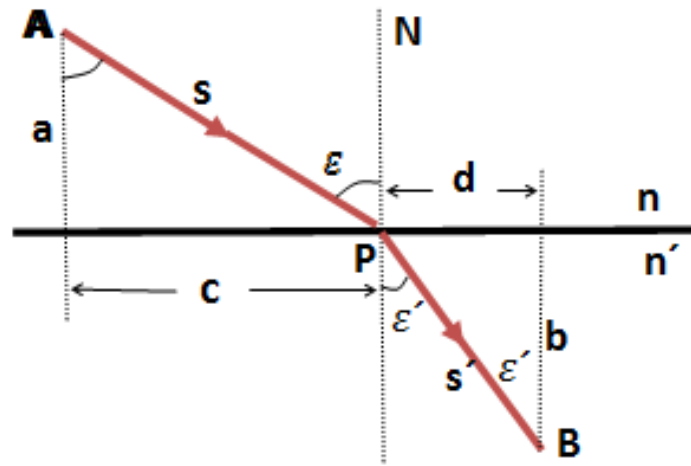


Figura 1.5: Puntos recorridos por la luz.

manera, el tiempo t hacia el camino APB es:

$$t = t_{AP} + t_{PB} = \frac{s}{v} + \frac{s'}{v'} \quad (1.9)$$

Donde v y v' son la velocidad en los medios con índices n y n' respectivamente. Dado que $s = a / \cos \varepsilon$ y $s' = b / \cos \varepsilon'$, al reemplazar en (1.9) se obtiene:

$$t = \frac{a}{v \cdot \cos \varepsilon} + \frac{b}{v' \cdot \cos \varepsilon'} \quad (1.10)$$

Derivando (1.10) e igualando a cero:

$$\frac{dt}{d\varepsilon} = \frac{a \cdot \sin \varepsilon}{v \cdot \cos^2 \varepsilon} + \frac{b \cdot \sin \varepsilon'}{v' \cdot \cos^2 \varepsilon'} \frac{d\varepsilon'}{d\varepsilon} = 0 \quad (1.11)$$

$$\frac{a \cdot \sin \varepsilon}{v \cdot \cos^2 \varepsilon} = -\frac{b \cdot \sin \varepsilon'}{v' \cdot \cos^2 \varepsilon'} \frac{d\varepsilon'}{d\varepsilon} = 0 \quad (1.12)$$

Ahora, la suma $(c + d)$ permanece constante sin importar el camino que toma la luz para ir desde A hasta B , de esta manera, su derivada con relación de ε viene dada por:

$$c + d = a \tan \varepsilon + b \tan \varepsilon' = \text{constante.} \quad (1.13)$$

$$\frac{d}{d\varepsilon}(c + d) = \frac{a}{\cos^2 \varepsilon} + \frac{b}{\cos^2 \varepsilon'} \frac{d\varepsilon'}{d\varepsilon} = 0 \rightarrow \frac{a}{\cos^2 \varepsilon} = -\frac{b}{\cos^2 \varepsilon'} \frac{d\varepsilon'}{d\varepsilon}. \quad (1.14)$$

Por lo tanto, si se hace una comparación de las expresiones (1.12) y (1.14) se encuentra que $\sin \varepsilon/v = \sin \varepsilon'/v'$. Teniendo en cuenta que $v = c/n$ y $v' = c/n'$, finalmente se llega a:

$$n \cdot \sin \varepsilon = n' \cdot \sin \varepsilon' \quad (1.15)$$

Siendo n el índice de refracción en el primer medio por el cual la luz se propaga y n' el del segundo medio. Ésta relación se denomina ley de Snell. Igual que en el caso de la reflexión, el rayo incidente, la normal y el rayo que se refracta se encuentran sobre el mismo plano, ver figura 1.6 [Benito, 1998].

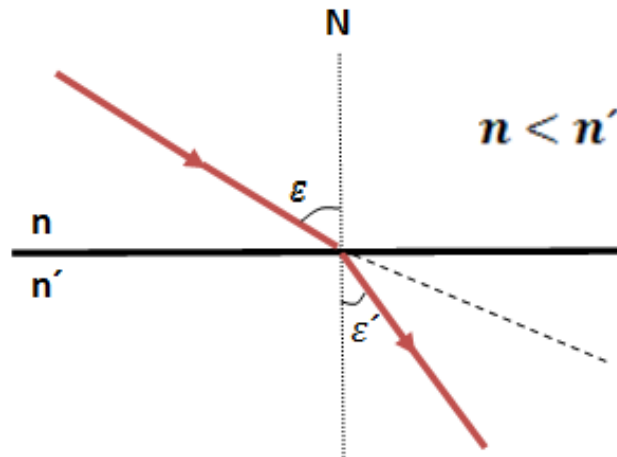


Figura 1.6: El paso de la luz de un medio a otro con índice mayor.

En la figura 1.6 se puede observar que si $n < n'$, pasa la luz de una medio a otro con mayor índice de refracción:

$$\sin \varepsilon / \sin \varepsilon' = n'/n \geq 1 \rightarrow \sin \varepsilon \geq \sin \varepsilon' \quad (1.16)$$

$$\varepsilon \geq \varepsilon' \quad (1.17)$$

Y como resultado el rayo refractado se acerca a la normal.

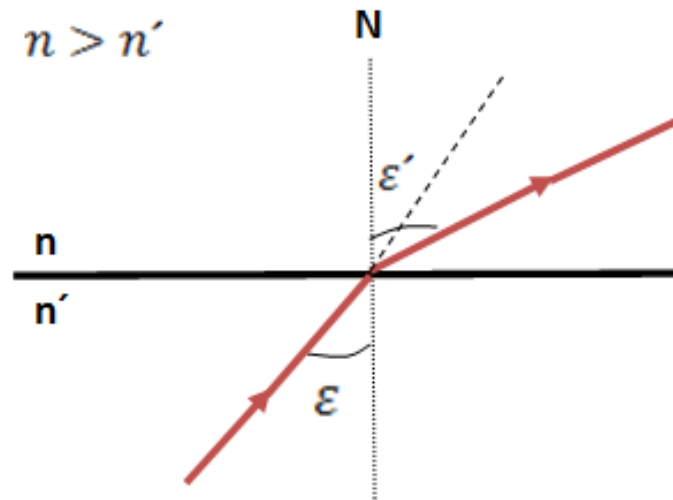


Figura 1.7: El paso de la luz de un medio a otro con índice menor.

En la figura 1.7 si $n \geq n'$ es el paso de la luz de un medio a otro con índice de refracción menor:

$$\sin \varepsilon' / \sin \varepsilon = n' / n \leq 1; \sin \varepsilon' \leq \sin \varepsilon \quad (1.18)$$

Por lo cual el rayo refractado se distancia de la normal.

Con lo anterior ya se tienen especificadas las leyes básicas que conforman parte de la óptica geométrica, por consiguiente se puede afrontar a uno de los problemas más habituales como la formación de imágenes en distintas superficies que reflejan y refractan la luz.

Sistema óptico

Un sistema óptico está determinado como el conjunto de dioptrios que separan medio de índice de refracción diferentes, por lo tanto un sistema óptico es muy común, ya que se puede decir que un fragmento de vidrio es catalogado como un sistema óptico, pero en este caso lo que se busca son sistemas que sean idóneos para formar imágenes de objetos, por lo tanto los sistemas ópticos están constituidos de la siguiente manera:

- Componentes: se hace uso fundamental de espejos.
- Componentes refractores: se hace uso fundamental de lentes.

Las componentes que se pueden hacer uso en un sistema óptico, son clasificadas posteriormente como:

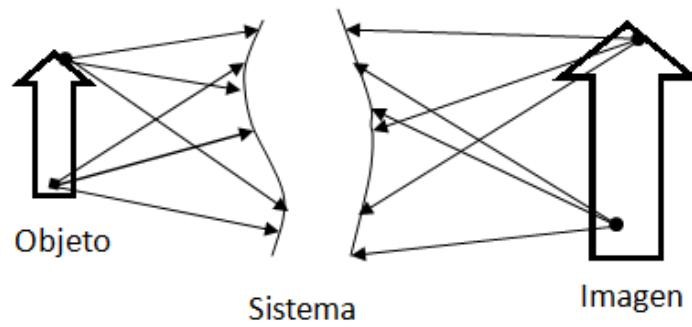


Figura 1.8: Se crea una imagen donde se fijan cada punto emitido por el objeto los cuales entrar al sistema óptico, y al traspasarlo cada haz que proviene de un punto se encontraran en un punto.

- Sistema dióptrico: únicamente utiliza lentes.
- Sistema catóptrico: únicamente utiliza espejos.
- Sistema catadióptrico: utiliza espejos y lentes.

Concepto de imagen

Se dice que de cada punto de un objeto emiten rayos luminosos que van en todas las direcciones, donde ciertos rayos pasan por el sistema óptico y se alejaran de cualquier forma en concreto, si los rayos de luz salen en conjunto de un punto del objeto, posteriormente pasan por el sistema óptico, asimismo los puntos convergen en un punto, esto sucede para todos y cada uno de los puntos que son emitidos por los objetos, de esta manera se puede decir que se ha formado una imagen en la figura 1.8 se puede apreciar un sistema óptico formador de imagen.

Por consiguiente se puede considerar que en la figura 1.8 los puntos emitidos por los objetos al traspasar el sistema óptico, no todos los rayos convergen en dirección a un conjunto de puntos que conforman una imagen. Sino que divergen a modo que pudieran pasar de un conjunto de puntos definidos, además se puede decir que se ha formado una imagen siendo esta distinta a la imagen anterior. En el anterior tema se habla de imágenes reales, entretanto en este tema se habla de la imagen real siendo está representada por la figura 1.9 donde los puntos del objeto parten de los rayos que traspasan el sistema óptico, pero en este caso los rayos no se hallan en ningún punto, y cada vez se van separando; por

el contrario si se localizan las prolongaciones de dichos rayos son señaladas como rayas discontinuas, las cuales forma una imagen virtual[Figueras Atienza, 2013].

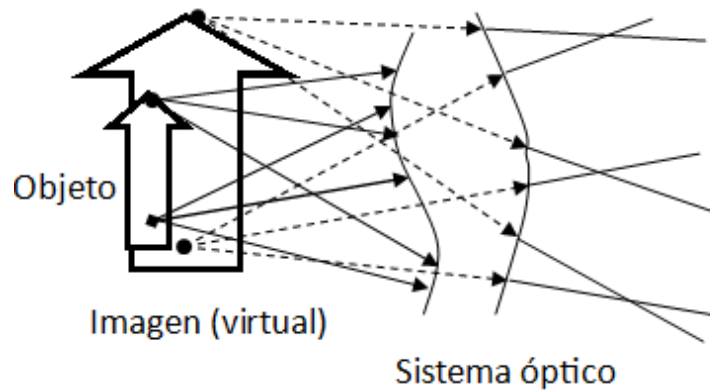


Figura 1.9: Imagen virtual en un sistema óptico.

De esta forma se define una **imagen real** como el conjunto absoluto de las interacciones de los rayos luminosos provenientes de todos los puntos de un objeto, luego de pasar por un sistema óptico.

Por otra parte se tiene la **imagen virtual** como el conjunto absoluto de las interacciones de las prolongaciones de los rayos luminosos provenientes de todos los puntos de un objeto, luego de pasar por un sistema óptico.

Con lo expuesto anteriormente las imágenes reales son posibles de ver fácilmente colocando una pantalla en un punto de convergencia de los rayos luminosos, simplemente se coloca una hoja de papel para observar la imagen real producida por un sistema óptico que analice esta imagen virtual como objeto propagándose en otra siendo esta real.

Esto quiere decir que al tener un sistema óptico que produce las imágenes virtuales siempre se necesitara un segundo sistema óptico para transformar las imágenes reales en virtuales, se puede decir que el ojo humano forma imágenes reales las cuales se proyectan sobre la retina, en realidad cuando se hace uso de una lupa para ampliar algo pequeño la imagen que genera la lupa es virtual, de modo que el ojo humano hace la función del segundo sistema óptico y cambian la imagen virtual en una imagen real sobre la retina[Figueras Atienza, 2013]. En el capítulo dos se podrá observar la formación de imagen correcta en el globo ocular, y cuando es afectado por defectos de refracción por lo tanto se emplean diferentes tipos de lentes divergentes y convergentes, para corregir dichos defectos en la siguiente sección se hablara de la clase de lentes y como se construye

la imagen en ellas.

1.1.5. Lentes

Un elemento óptico ampliamente usado es la lente y de hecho, el ojo humano está compuesto por algún arreglo de estas. En general, una lente es un dispositivo refractor que reconfigura una distribución de energía transmitida[Hecht, 2002]. Las lentes son la base de variados instrumentos ópticos. Se encuentran constituidas por dos superficies refractoras de radios esféricos r_1 y r_2 , respectivamente, separados una distancia e . Estas superficies delimitan un medio material de índice de refracción n .

También se dice que una lente es un sistema óptico compuesto por dos dioptrios, donde por lo menos uno de ellos es curvo, delimitando un medio óptico. En la figuradura 1.10 se aprecia la representación de una lente esférica, compuesta por dioptrios esféricos. Los radios $R1$ y $R2$ de las superficies esféricas, tienen como centro los puntos $C1$ y $C2$ [Hecht, 2002].

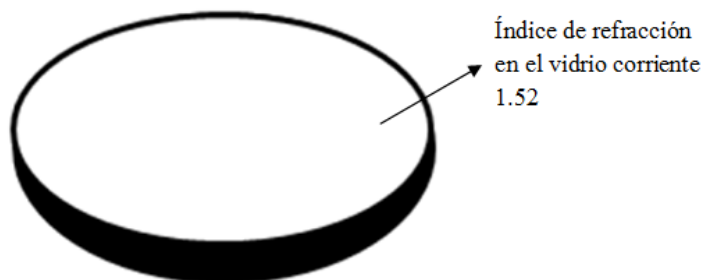


Figura 1.10: Lente de vidrio delimitado por dos superficies esféricas.

Teniendo en cuenta la forma de la superficie refractora esférica, las lentes se encuentran clasificadas de la siguiente manera: biconvexas, bicóncavas, plano convexas, plano cóncavas, menisco convergente, menisco divergente. En la figura 1.11 se observan los tipos de lentes con sus respectivos símbolos[Aristizábal and Restrepo, 2012].

Las lentes divergentes y convergentes tienen diferentes características las cuales hacen que sean especiales. En este caso, las lentes que se conocen como convergentes o positivas cumplen con las siguientes cualidades: el centro es más grueso y tienden a reducir el radio de curvatura de los frentes de onda, es decir, que una onda converge a medida que va pasando por la lente, por lo tanto, el índice de la lente es mayor que el medio

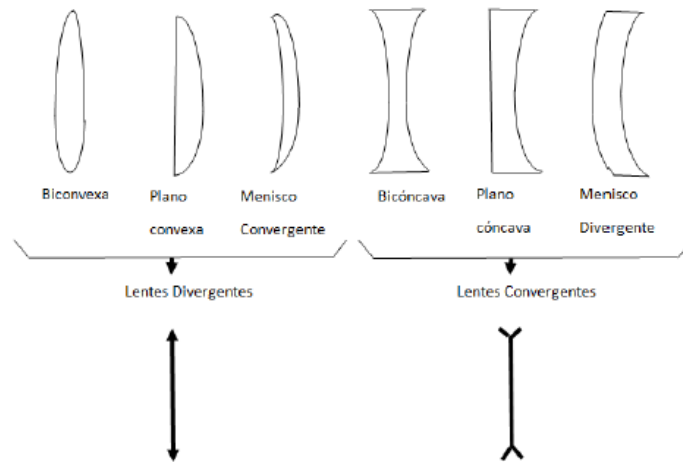


Figura 1.11: Lentes divergentes y convergentes.

en el cual esta se sumerge. Por otra parte, las lentes cóncavas divergentes o negativas se diferencian de las convergentes, por su centro más delgado, y porque un frente de onda que la atraviesa diverge [Hecht, 2002].

Lentes delgadas

Una lente se clásica como delgada cuando su espesor es considerablemente menor respecto a cada uno de sus radios de curvatura. En este caso, la distancia focal se puede determinar a partir de:

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \quad (1.19)$$

Por lo cual el rayo refractado se distancia de la normal.

Donde la clasificación de si se trata de lentes de forma positiva o negativa depende del signo a partir de su distancia focal. A continuación se presentan los tres casos que siguen la convención de signos dada por los radios de curvatura y la posición donde se encuentra el objeto e imagen, usando la lente delgada.

1. Lentes positivas, biconvexas y planas - convexas, como se observa en la figura 1.12.

Para este caso $r_1 \geq 0$ o $r_1 = \text{inf}$, $r_2 \geq 0$ o $r_2 = \text{inf}$, de esta manera se obtiene $(1/r_1 - 1/r_2) \geq 0$ por lo tanto $f \geq 0$.

1. Lentes negativas, bicóncava y plano - cóncava, en la figura 1.13 se puede evidenciar que si $r_1 \leq 0$ o $r_1 = \text{inf}$, $r_2 \geq 0$ o $r_2 = \text{inf}$, en consecuencia $(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}) \leq 0$ y $f \leq 0$.

1. Lentes menisco o meniscos, el signo de f puede ser positivo o negativo.

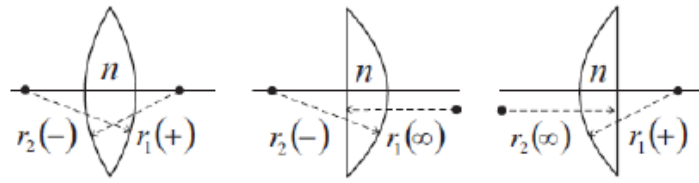


Figura 1.12: Lentes biconvexa y plano-cóncavas o lentes positivas $f \geq 0$. Imagen tomada de[Cornejo Rodríguez, 2006]

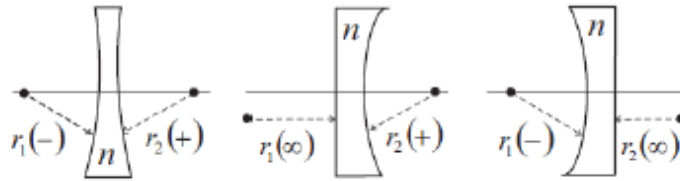


Figura 1.13: Lentes bicóncavas y plano- cóncavas, negativas $f \leq 0$. Imagen tomada de[Cornejo Rodríguez, 2006].

1.1.6. Construcción de imágenes en una lente delgada.

Se debe considerar una expresión que posibilite el cálculo de la ubicación de la imagen (s'), teniendo en cuenta la del objeto (s), de esta manera los radios de la lente r_1 y r_2 , también los índices de la lente (n_2) y de los medios en los que se está propagando n_1 y n_2 ; para esto se debe considerar que una lente está compuesta por dos dioptrios, donde uno de ellos por lo menos es esférico como se puede apreciar en la figura 1.14 la superficie inicial de la lente recibe los rayos provenientes del objeto O produciendo una imagen virtual O' ubicado a una distancia s . Siendo la imagen O' hace de objeto en dirección hacia la segunda superficie, debido a que en esta todo transcurre como si los rayos que van hacia ella provinieran del objeto O' ubicado en el medio del índice n_2 , así que la segunda superficie produce la imagen concluyente O'' ubicada a una distancia s' de la lente, se debe considerar que las distancia objeto (s) e imagen (s') hay que tener en cuenta que por conocerse de lentes delgadas su espesor es despreciable, pero en la figura 1.14 se ha ilustrados una lente con espesor el cual facilita el entendimiento del razonamiento de modo, que los rayos se han ilustrado con inclinaciones apreciables pero se debe tener en cuenta que son praxiales[Benito, 1998].

por otra parte se aplica la fórmula de Gauss $\frac{n'}{s'} - \frac{n}{s} = \frac{(n' - n)}{r}$ en el primer dioptrio se

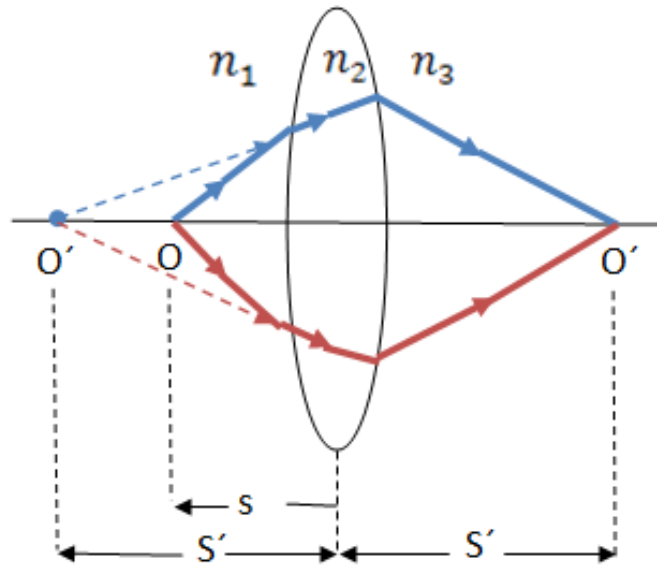


Figura 1.14: Formación de imagen en una lente delgada.

alcanza a la posición de la primera imagen ó:

distancia objetos = s ; distancia imagen = s^* ; índice primer medio = n_1 ; índice segundo medio n_2

$$\frac{n_2}{s^*} - \frac{n_1}{s} = \frac{(n_2 - n_1)}{r_1} \quad (1.20)$$

Y se aplica al segundo dioptrio

distancia objetos = s^* ; distancia imagen = s ; índice primer medio = n_2 ; índice segundo medio n_1

$$\frac{n_3}{s} - \frac{n_2}{s^*} = \frac{t(n_3 - n_2)}{r_2} \quad (1.21)$$

Y sumando cada una de las expresiones da como resultado:

$$\frac{n_3}{s} - \frac{n_1}{s} = \frac{(n_2 - n_1)}{r_1} + \frac{(n_3 - n_2)}{r_2} \quad (1.22)$$

Dicha expresión queda definida como fórmula de construcción de lentes.

En casos particulares sucede lo siguiente:

- a) Lente delgada con índice n introducida en un medio con un índice n'

Por lo tanto se tiene: $n_1 = n_3 = n$ (*medio*) y $n_2 = n$ (*lente*)

Sustituyendo la fórmula de las lentes, da como resultado :

$$\frac{\acute{n}}{s} - \frac{\acute{n}}{s} = \frac{(n - \acute{n})}{r_1} + \frac{(\acute{n} - n)}{r_2} = (n - \acute{n}) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (1.23)$$

- b) La lente delgada es introducida en aire

dando como resultado: $n_1 = n_3 = 1$ (*aire*) y $n_2 = n$ (*lente*)

Y se reemplaza la ecuación de las lentes queda : $\frac{1}{\acute{s}} - \frac{1}{s} = (n - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$

Esta ecuación está relacionada con las distancia a la que se genera una imagen, (\acute{s}) por medio de la distancia a la que se encuentra localizado el objeto, (s) y las particularidades de la lente delgada, donde su índice de refracción es n y sus radios de curvatura vienen siendo las superficies r_1 y r_2 .

En el siguiente capítulo se podrá observar cual es el tipo de lentes que se debe usar para la corrección de los defectos refractivos.

Capítulo 2

Modelamiento del ojo humano desde la óptica geométrica.

La vista de los seres humanos es un sofisticado sistema óptico convergente el cual es considerado casi esférico, formando una imagen invertida de los objetos del entorno. La luz al ojo atraviesa la córnea, una capa transparente y aproximadamente esférica con un radio de alrededor de $8mm$ de curvatura. Posteriormente, la luz refractada que pasa por la córnea se enfoca, para formar una imagen sobre una capa sensible denominada retina, la cual está ubicada en la parte profunda del globo ocular [Puell Marín, 2006]. La capa protectora que da forma al ojo se conoce como esclera. Esta capa es compuesta por un tejido fibroso, denso y de coloración blanco opaco. Es aproximadamente esférica y tiene un radio de curvatura que ronda los $12mm$ [Atchison and Smith, 2000]. En la figura 2.1 se puede apreciar los aspectos fisiológicos más importantes del ojo humano [Benito, 1998], y teniendo en cuenta como se generan las imágenes a partir de la potencia óptica del globo ocular [Gómez González, 2006].

- Cornea: lente menisco convergente.
- Iris: Pequeño agujero circular que vienen siendo la pupila, la cual cuenta con un diámetro, variando su forma de 2 a $8mm$ permitiendo la regularización del paso de luz al ojo.
- Cristalino: Lente biconvexa elástica, al tener esta propiedad puede cambiar su forma por medio de los movimientos que realizan los músculos ciliares.

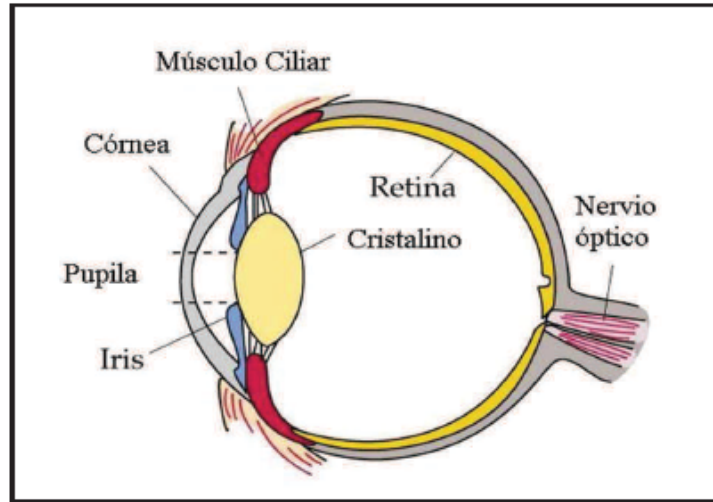


Figura 2.1: Fisionomía del ojo humano.[Benito, 1998]

- Retina: Capa de fibras nervios que reviste la parte interna del ojo.
- Nervio óptico: Es el encargado de unir la retina con el cerebro para transmitir la información lumínica percibida por la retina[Benito, 1998].

Se puede decir que la visión de un ojo es de gran nitidez, la imagen debe generarse en la retina la cual hace de pantalla, se sabe que la posición de la imagen depende de la posición del objeto, esto quiere decir que sin importar donde se genere la imagen siempre va a llegar a la retina ya que el cristalino puede modificar su forma por medio de los músculos ciliares, obteniendo la potencia debida para lograr que la imagen producida siempre llegue a la retina, sin tener en cuenta la posición del objeto, por lo tanto a esta fase de enfoque dada a la potencia del cristalino incrementa a medida que el objeto se acerca, esto se denomina acomodación.

2.0.1. Descripción del sistema ocular desde la óptica geométrica

Cabe mencionar que el cristalino tiene como función transformar la distancia focal, permitiendo enfocar objetos a cualquier distancia. La cornea tiene una capacidad más amplia para refractar pero no puede alterar la distancia focal, esto quiere decir que el ojo cuando enfoca objetos a longitudes lejanas, el cristalino se halla relajado al momento de enfocar un objeto. Sin embargo, se encuentra el sistema cornea lente que trabaja sin acomodación[Gómez González, 2006]. Cuando el objeto se va acercando al ojo los músculos ciliares

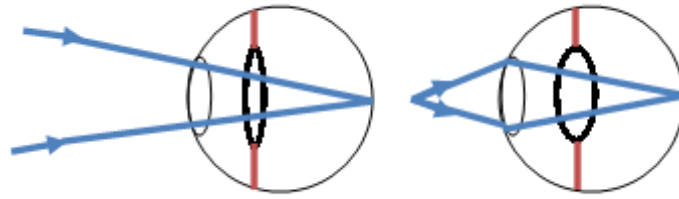


Figura 2.2: El cristalino cambia su forma para dar la acomodación.

se van colocando rígidos, esto hace que se amplíe la circunferencia del cristalino, por esta razón se puede decir que el ojo humano se iguala algunas lentes con potencia que admiten la formación de imágenes[Gomez, 2010].

Adaptación

Es la capacidad que tiene el globo ocular para posicionar la longitud del iris, controlando el paso luminoso de la luz que entra al ojo. Las variaciones son generadas por un reflejo involuntario.

Acomodación

Cuando los rayos provenientes del infinito en las personas con ametropías se focalizan de manera natural sobre la retina, no obstante los rayos de los objetos que se encuentran próximos arriban de manera divergente, siendo focalizados por detrás de la retina es decir que se encuentra desenfocados, para mitigarlo se modifica el cristalino figura2.2 aumentando la capacidad dióptrica del ojo [Guzmán Martín et al., 2008]

Por otro parte se tiene la función del cristalino ya que cambia su curvatura, el cristalino ampliando el enfoque del objeto. De esta manera la acomodación es determinada como la habilidad que tiene el ojo de aumentar su capacidad de refracción siendo capaz de enfocar los objetos cercanos, esto es debido al aumetor del espesor y su curvatura en la región central del cristalino, es dado por la acción que realizan los músculos ciliares al contraerse[Guzmán Martín et al., 2008].

Ya definida la acomodación del ojo humano, se tiene en cutan la potencia óptica del globo ocular es de unas 60 (dioptrías), donde la córnea obtiene unas 43 (dioptrías), el área de curvatura de la córnea es $8mm$ y el radio total del ojo a lo largo del eje óptico es de

25mm ya que el humor vítreo es de ($n_v = 1,337$) completando la distancia focal posterior del ojo y pospone la distancia focal.

$$f = \frac{1}{\Upsilon} \approx 17mm \quad (2.1)$$

$$f_r = n_v f \approx 23mm \quad (2.2)$$

Entonces el cambio fisiológico se pueden evidenciar en una alteración inclusive de un 25 %, con estas características el cristalino viene siendo una lente gradiente con índice no homogéneo, y cuenta con índice de refracción superior en su área central, en el momento que el globo ocular se encuentra relajado o enfocando al infinito, la potencia del mismo es de unos 19 (Dioptrios), entre tanto para observar objetos próximos, donde los músculos ciliares se contraen incrementando la potencia de la lente, ampliando sus radios de curvatura y se encuentra en una categoría de acomodación que oscila hasta 15 (dioptrios), no obstante se reduce con la edad de la persona por lo tanto[Gómez González, 2006]. La región circular que rodea la córnea se hace todavía más pequeña mientras el radio de la superficie se disminuye, la distancia para que un joven que está en la adolescencia enfoque un punto cercano, es de unos 7cm. Para una persona que se encuentra en una edad joven adulta su enfoque será de 25cm y para una persona que se encuentra en una edad media o avanzada su punto de enfoque es de 100cm, este fenómeno debe tener en cuenta para el diseño de instrumentos visuales, de tal modo que, al momento que el globo ocular enfoque, su esfuerzo sea mínimo[Palomo, 2003].

Con lo dicho anteriormente se tiene en claro la capacidad que tiene el ojo huma para forma las imágenes y como estas son enfocadas de manera idónea, de esta manera en la siguiente sección se trataran los defectos refractivos o ametropías, causantes de que los rayos de luz emitidos por los objetos no sean focalizados de forma adecuado produciendo una disminución visual y vista borrosa.

2.0.2. Defectos Refractivos Ametropías En El Globo Ocular (Miopía, Hipermetropía y astigmatismo)

2.0.3. Miopía

Es una alteración refractiva la cual viene dada por un exceso longitudinal ocular o por una desmedida curvatura del cristalino, haciendo que el dioptrio tenga una variación en su amunto. También se puede dar por las dos cosas al mismo tiempo. De esta forma, los rayos que son semejantes llegan al globo ocular posicionándose por delante de la retina. Haciendo que los objetos cercanos sean vistos con claridad y a su vez las imágenes que están a una distancia lejana sean vistas de manera borrosa. En la siguiente figura2.3 se puede observar un esquema de la miopía[Fernández and Fernández, 2001], donde las imágenes de los objetos que se encuentran a mayor distancia son ubicadas por delante de la retina, por esta razón la miopía es denominada visión corta.

En la figura2.3 se observa como los rayos luminosos pasan por el ojo con miopía y se focalizan por delante de la retina.

Por lo tanto pasan por la lente convergente (negativa) haciendo que se focalicen geométricamente en la retina [Palomo, 2003]. A continuación se presentara con más detalle el problema y la solución de dicho defecto en el globo ocular.

Se puede decir que el globo ocular cuenta con un punto remoto y su distancia es de $2m$, de esta manera no se encontrara ningún problema cuando la lente de las gafas puede aproximar los objetos que se encuentran lejos o a más de $2m$. De forma que, sino esta la imagen virtual en el infinito se genera una lente cóncava a $2m$, así el ojo podrá obtener una mejor definición de las imágenes si la acomodación del cristalino es la adecuada.

En la siguiente ecuación se puede describir la distancia focal desde una lente correctiva.

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i} = \frac{1}{\infty} + \frac{1}{-2} \quad (2.3)$$

Y $f = -2m$ mientras que $D = \frac{-1}{2D}$. Se observa que la distancia al punto lejano y la medida desde una lente correctiva, la cual equivale a su distancia focal, el ojo ve todas las imágenes derechas de todos los objetos por la lente correctiva estando dichas imágenes entre su punto lejano y próximo[Hecht, 2002].

Problema

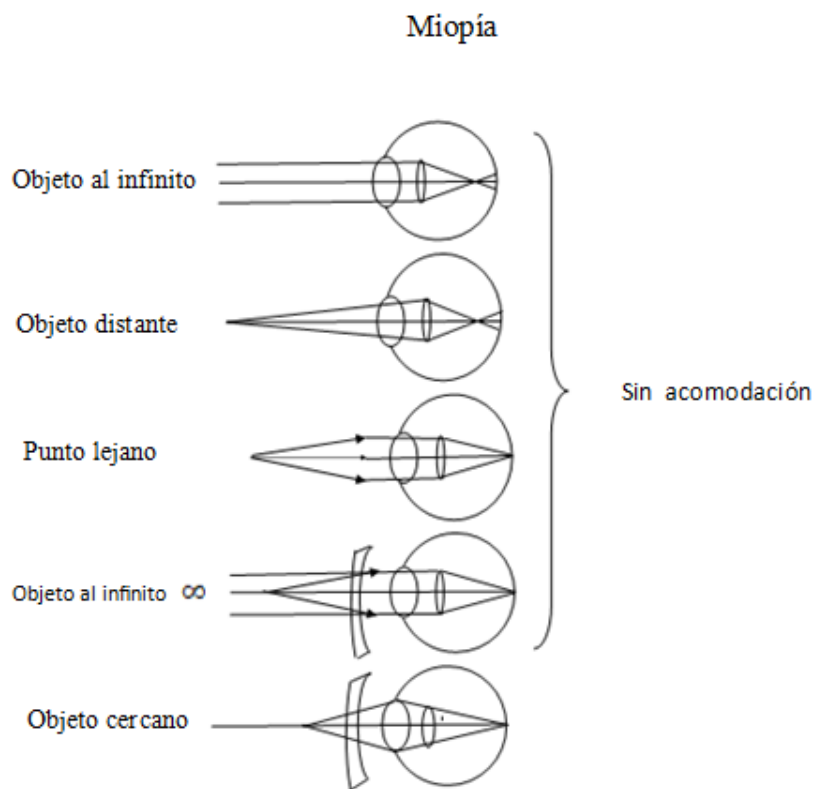


Figura 2.3: Posición del foco imagen en el ojo miope.

La potencia óptica del globo ocular es mayor a su longitud o en este caso converge más que un ojo sin defecto, así las imágenes de los objetos que se encuentran distantes se forman por delante de la retina.

- El punto alejado es situado a una longitud infinita.
- El punto cercano esta más corto que el del ojo sin defecto.
- Se puede decir que es como si se tuviera una lente convergente posterior al ojo.

Corrección

Se sitúa un tipo de lente, en este caso divergente, donde su foco imagen se encuentra en el punto lejano del ojo miope, logrando que el punto lejano llegue al infinito, siendo esta una lente negativa, la cual hace que los rayos de luz que pasan suavemente y diverjan.

2.0.4. Hipermetropía

La hipermetropía está conformada por rayos de luz semejantes los cuales son emitidos por un objeto en el infinito, dichos rayos se posicionan por detrás de la retina, generándose las siguientes consecuencias. Al focalizar los objetos que se encuentran a distancias próximas llegan borrosos al ojo, pero los objetos que se encuentra a distancias lejanas son focalizados nítidamente por el globo ocular. A partir de lo anterior, la hipermetropía se genera porque el ojo es demasiado corto, haciendo que la convergencia que existe entre la córnea y el cristalino sea deficiente, pero en otros casos puede encontrar una mejora ya que el ojo en el crecimiento amplía su tamaño cuando se encuentra a una edad de 14 años y su poder convergente de las cornea cambia[Fernández and Fernández, 2001]. En la figura 2.4 se observa un esquema de la hipermetropía. El ojo puede y debe llevar a cabo la operación de la acomodación para ver distantemente los objetos lejanos, pero estará en su límite al hacerlo para un punto próximo determinado que esta mucho más alejado de lo habitual (*unos 24mm a 25cm*) siendo incapaz de ver claramente [Hecht, 2002].

En esta imagen se observa como los rayos luminosos pasan por el ojo con hipermetropía y se focalizan por detrás de la retina, y en la otra imagen se puede observar como los rayos

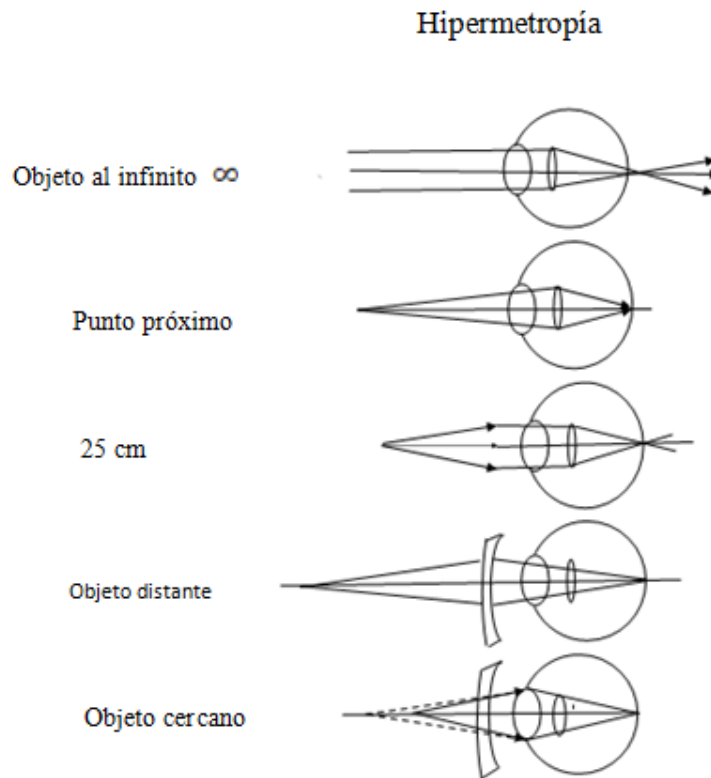


Figura 2.4: Posición del foco imagen en el ojo hipermetrope.

luminosos pasan por la lente convergente (*positiva*) haciendo que se focalicen geométrica-mente en la retina[Hake, 2007]. A continuación se presentara con más detalle el problema y la solución de dicho defecto en el globo ocular.

Problema

- Como se mencionó anteriormente el globo ocular es demasiado corto y poco con-vergente que en un ojo sin defecto, generándose la imagen clara por detrás de la retina.
- El punto lejano se encuentra por detrás de la retina.
- El punto cercano se encuentra a mayor distancia que la de un ojo normal.
- Se puede decir que es como si se tuviera una lente convergente por delante del ojo.

Corrección:

- Se coloca una lente convergente situando el foco imagen en el punto lejano del ojo hipermetrope
- De esta manera se puede colocar el punto lejano al infinito.

Finalmente, cuando el ojo es menos convergente de lo que debe ser, se da como resultado imágenes que se enfocan por detrás de la retina. Una persona hipermetrope es aquella que ve correctamente objetos a distancias lejanas.

2.0.5. Astigmatismo

El astigmatismo es un defecto refractivo y está dado por la curvatura que toman los rayos en los distintos medios, de esta manera el ojo produce una imagen con varias líneas focales las cuales no llegan de una sola a la retina[Arancón et al., 2014], de modo que el valor dióptrico es diferente en cada dirección del ojo. En otras palabras, el haz de luz procedente de un punto individual no llega a tiempo[Fernández and Fernández, 2001], haciendo que sufra una refracción, por ende al pasar por las estructuras oculares arroja una visión borrosa de los objetos que están alrededor[Guzmán Martín et al., 2008].

El astigmatismo se genera cuando el cristalino se achata por la parte de arriba y de abajo perdiendo su forma esférica, esta modificación se debe por el cambio sobre las lentes[Arancón et al., 2014] haciendo que la luz incidente en el ojo no se refracte de manera adecuada en los meridianos en forma uniforme ni en direcciones iguales como se puede ver en la 2.5. Por otra parte, la superficie de la cornea sufre un cambio de curvatura más pronunciada en una parte diferente que la otra[Guzmán Martín et al., 2008]. Lo anterior hace que esta no sea esférica y se puede afirmar que el astigmatismo está relacionado con la miopía y la hipermetropía[Young et al., 2009].

La corrección del astigmatismo se da por medio de una lente con superficie cilíndrica, en este caso el grosor de la lente debe ser mayor en el centro. Además el grosor de lente aumenta cuando el astigmatismo se hace más fuerte, al suponerse que la curvatura de la córnea es plano horizontal. Esta debe ser correcta para enfocar los rayos provenientes del infinito que se posicionan en la retina, así que la curvatura en el plano vertical es demasiado amplio para producir una imagen de mayor nitidez en la retina[Young et al., 2009]. De manera que se emplea una lente con características cilíndricas y cuenta con un eje horizontal, dicha lente se coloca por delante del ojo sin modificar los rayos luminosos

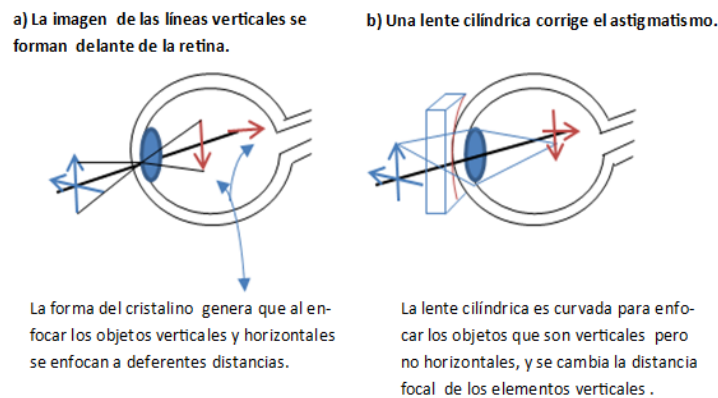


Figura 2.5: Se observa el defecto refractivo y su corrección con una lente cilíndrica.

que se encuentran sobre el plano horizontal, la divergencia que se en cuenta en el plano horizontal aumenta al paso de los rayos de luz, haciendo que el objeto en foco sea una imagen nítida formada en la retina [Atchison and Smith, 2000].

De acuerdo con lo mencionado, al utilizar una lente correctora para mejorar la visión y se encuentra en términos de su potencia, esta se define como el inverso de la distancia focal denotada en metros y su unidad esta expresada en términos de la potencia denominada dioptría.

A continuación se mostrara un ejemplo de una fórmula para la corrección del astigmatismo, en este caso para un ojo será de $(-1; 00 - 1; 25x180)$. Así el número que se mide $(-1; 25)$ viene siendo la potencia generada por la lente para corregir el defecto de refracción. Por otra parte se tiene $x180$ y se denomina como la ubicación del (*eje*) por donde va la potencia de la lente, por otra parte se tiene el primer número $(-1; 00)$ que a su vez indica que esta fórmula adjunta la corrección para la miopía.

Las gafas son la primera opción de corrección para las personas con astigmatismo, ellos contienen una prescripción especial de lente cilíndrica para compensar el astigmatismo. Esto proporciona una potencia de la lente adicional en solo meridianos específicos de la lente. Un ejemplo de una receta para el astigmatismo de un ojo será $-1; 00 - 1; 25x180$. El número medio $(-1; 25)$ es la potencia de la lente para la corrección del astigmatismo. La $x180$ designa a la colocación (*eje*) de la potencia de la lente. El primer número $(-1; 00)$ indica que esta receta también incluye una corrección de la miopía [Arancón et al., 2014].

Tipos de Astigmatismo

- Astigmatismo Regular: Se debe a que los meridianos o eje del ojo refractan la luz de manera que forman un ángulo recto, esto es debido a la curvatura de la córnea ya que ha pasado por algunas modificaciones dependiendo de cómo se refracte la luz en los meridianos del ojo.
- stigmatismo irregular: Se produce por alteraciones en la curvatura de la córnea debido a lesiones, cicatrices corneales en este caso se forman dos paralelos que de manera irregular refractan la luz dando una intensidad variada.
- Debido a una intervención quirúrgica se puede ver retraída la capa de la córnea, lo que provoca modificaciones en la refracción de la luz que suelen ser temporales y arreglarse de manera espontánea[Arancón et al., 2014].

Capítulo 3

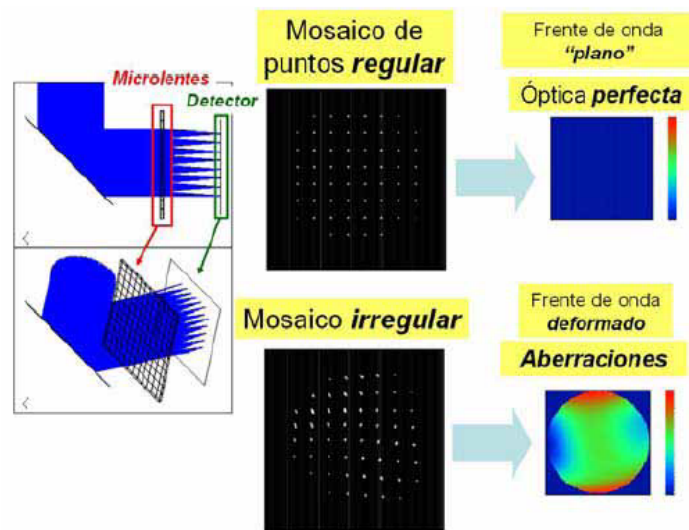
Aberraciones ópticas y la representación de un frente de onda desde los polinomios de Zernike.

3.0.1. Aberraciones en el globo ocular

Las aberraciones es un fenómeno que se puede interpretar a partir de la física asegurando, que todos los frentes de onda emitidos por la luz que recorren por un sistema óptico, son paralelos al plano principal que pasa por el medio de la pupila, la proporción de dicha disparidad es llamada aberraciones del frente de onda en un globo ocular[[Olarde, 2011](#)].

De esta manera para comprender el significado de las aberraciones que poseen un nivel ocular, es fundamental tener una representación del globo ocular como un modelo aberrado que genera imágenes en la retina las cuales no son tan definidas y perfectas, un sistema óptico que se encuentra en optimas condiciones origina un frente de onda esférico por encima de la pupila de salida, por lo tanto cualquier sistema óptico interpretara algunos defectos proporcionando que el frente de onda, no se encuentre totalmente esférico haciendo que la imagen formada no sea adecuada, en la figura 3.1 se puede observar un frente de onda el cual pasa por un detector el cual da un análisis de cuando es regular e irregular[[Olarde, 2011](#)].

Una manera de determinar las aberraciones es calculando la disparidad que se encuentra en el frente de onda formado por el sistema y un frente de onda esférico de referencia, por lo tanto es llamado aberración de onda, el frente de onda es el plano del camino



h!

Figura 3.1: El paso de un frente de onda plano por las microlentes [Olarte, 2011]

óptico continuo en un solo punto del objeto. Dichos yaros luminosos por lo general son invariables y perpendiculares, por lo tanto se muestra como un sistema óptico el cual está completamente libre de aberración, teniendo un frente de onda esférico genera imágenes perfectas en la retina, así todo rayo que se focaliza en un ponto exacto del plano imagen, donde la ubicación del objeto depende de la ubicación en la pupila, la imagen de un punto para este caso únicamente se deteriora por efecto de la difracción, dado a la naturaleza ondulatoria de la luz, ya que el frente de onda deja de ser esférico y el rayo traspasa el plano imagen en un punto diferente y solo depende de la altura que toma la pupila de entrada, por lo tanto la imagen producida en la retina es una mancha más borrosa la cual es prolongada y desproporcionada, originando un sistema óptico aberrado el cual se puede observar en la figura3.2 [Artal et al., 2002].

En el segmento (a) se puede analizar el frente de onda a los rayos que llegan a la parte profunda del globo ocular, en el segmento (b) los rayos paralelos que llegan a la retina, estos se separan y llegan a diferentes puntos de la retina por lo tanto el frente de onda deja de ser esférico generando una aberración óptica [Olarte, 2011].

En un sistema óptico siempre se va a encontrar un diafragma de abertura, el rayo que recorre su centro se llama principal, y la pupila de entrada es determina como la imagen de apertura en el espacio objeto, de modo que la pupila de salida será su imagen en el espacio imagen, en absoluto los rayos que son originados de un punto objeto, únicamente los rayos que recorren por la pupila de entrada llegan al sistema sobresaliendo por la pupila

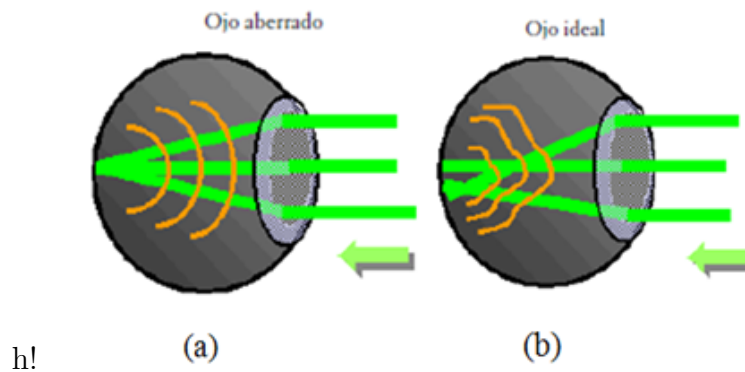


Figura 3.2: Ojo sin aberración y ojo con aberración[Dorrnsoro et al., 2003].

de salida, generando la imagen, en la pupila de salida se analiza una esfera de referencia la cual viene siendo un frente de onda esférico y sin aberraciones[Silvia and Martin, 2013]. por lo tanto las aberraciones ópticas son irregularidades de un sistema óptico que genera imágenes irregulares, lo cual dificulta la generación de una réplica nítida e idéntica del objeto de fijación. Al observar un ojo que tiene un defecto de refracción se hallan los rayos de luz que van perdiendo su homogeneidad y alguno de ellos avanza o se retarda con relación al plano de referencia esto se le llama, aberración óptica o irregularidad del frente de onda[Olarte, 2011].

Tipos de aberraciones oculares

La importancia óptica de la imagen formada en la retina es descrita por las aberraciones visuales, donde la difracción y la dispersión interna del ojo son aberraciones que se encuentran distribuidas en aberraciones monocromáticas y cromáticas. Las aberraciones de bajo orden incluyendo los defectos refractivos, y las aberraciones de alto orden las cuales no tienen corrección con el uso de lentes divergentes o convergentes de tal modo ocurre en la aberraciones de bajo orden, por este motivo se puede decir que las aberraciones monocromáticas son corregidas mediante la cirugía refractiva, no obstante las aberraciones cromáticas tienen diferentes longitudes de onda aún no ha sido posible una corrección[Tomás, 2014].

El globo ocular puede experimentar múltiples aberraciones, esto es debido primordialmente a que el eje ocular no se ajusta al eje óptico pues las áreas del ojo son faltas de simetrías de revolución y se encuentran periféricos e inclinados las unas con relación a las

otras, de acuerdo con la aberración en la pirámide donde tiende a desgastarse de orden superior o inferior tamaño de la calidad de imagen retiniana. Por lo tanto se tienen en cuenta que tanto se encuentre más arriba de la pirámide y el eje este centrado, este se sitúa una aberración, provocando un impacto a gran escala la calidad visual del paciente y se reduce ya que se aleja el eje se ubica la aberración siendo más baja.


A partir de lo anterior se tiene una gama de colores para identificar las aberraciones y sus formas geométricas ubicadas en la pirámide, por lo tanto en la gama del color verde se evidencia un grado cero de medición en micras sin ninguna incorrección en el aberrometro, en los colores fríos indicando que el frente de onda es lento en este caso puede retrasarse o retrasarse en micras correspondientes al plano ideal, en cambio los colores cálidos son interpretados como un frente de onda avanzado con relación al frente de onda ideal, donde todos los componentes son interpretados en una configuración geométrica particular, permitiendo que los elementos se separen o en otros términos sean representados en una escala de magnitud de la aberración, por lo cual en cada fila de la pirámide le corresponde un valor que se encuentra en ordenes de n y cada columna cuenta con una frecuencia m distinta, así los armónicos que se encuentran en el rango de cosenos están asociados con la frecuencia positiva, en cambio los armónicos que se encuentran en el rango de seno se relaciona con la frecuencia negativa [Olarte, 2011].

Con lo anterior se consideran los tipos de aberraciones en el siguiente orden:

■ **Aberraciones Constantes**

Se conoce el rango de cero y uno donde se encuentra en la parte de la pirámide la cual contiene tres aberraciones, de esta manera los sistemas ópticos no son variables, asimismo el pistón, el tilt y tip como se aprecian en la siguiente tabla1, donde el pistón horizontal vienen siendo un adelanto o un retroceso del frente de onda. Ya que se encuentran en el plano focal ubicado en la pupila de salida la cual está localizada en un sistema óptico[Olarte, 2011], y se encuentra inclinado vertical y horizontalmente en el meridiano sin tener en cuenta para el cálculo total de la (aerometría), donde se analiza la forma natural del movimiento ocular y sin deteriorar en el plano retiniano que capta la imagen percibida, en la tabla3.3 se observan las aberraciones constantes.

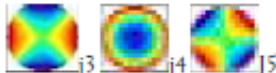
ÍNDICE J	ORDEN N	FRECUENCIA M	NOMBRE
0	0	0	Pistón
1	1	-1	Tilt
2	1	1	Tip



j_1

Figura 3.3: Aberraciones constantes fuente estándar [Thibos et al., 2002]

ÍNDICE J	ORDEN N	FRECUENCIA M	NOMBRE
3	2	-2	Astigmatismo
4	2	0	Desenfoque
5	2	2	Astigmatismo



j_3 j_4 j_5

h!

Figura 3.4: Aberraciones de bajo orden [Thibos et al., 2002]

■ Aberraciones de bajo orden

Se denomina aberración de orden o de segundo orden las cuales se encuentran en nuestra vida cotidiana, ocupando el segundo orden de astigmatismo en la tabla 3.4 se puede observar la aberración de bajo orden y un desenfoque esférico que representa el error refractivo los cuales se acostumbra a corregir con lentes oftálmicas [Olarte, 2011] donde los rayos centrales son correspondientes a los periféricos y pueden ser positivos o negativos dependiendo el defecto refractivo miopía o hipermetropía [Tomás, 2014].

■ aberración de alto orden

Al presentarse aberraciones de alto orden en el globo ocular son denominadas desde el tercer orden como aberraciones de alto orden, al crecer el orden de la aberraciones en la pirámide el efecto será menor en la agudeza visual de paciente, su número

ÍNDICE J	ORDEN N	FRECUENCIA M	NOMBRE
6	3	-3	Trefoil
7	3	-1	Coma vertical
8	3	1	Coma horizontal
9	3	3	Trefoil

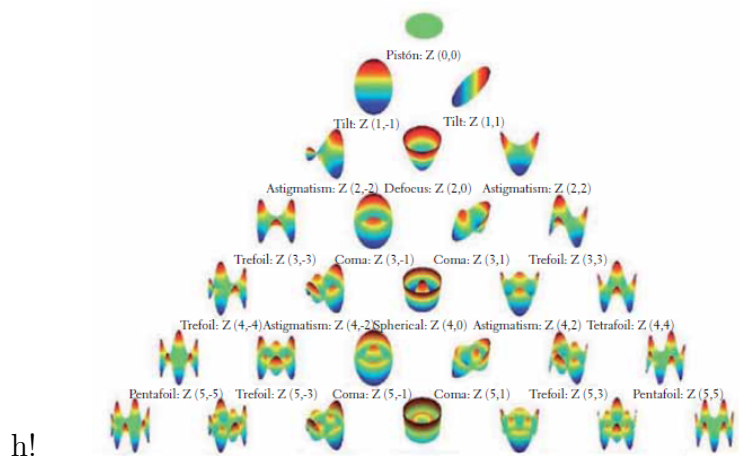
h!

Figura 3.5: Aberraciones de alto orden [Thibos et al., 2002].

alcanza un aumento hasta el infinito ya que hace parte del espectro óptico el cual no se acostumbra a corregir, por lo tanto se debe tener en cuenta que la aberraciones de alto orden en la visión se encuentra en un 15 % desde otro modo de vista práctico , únicamente es importante analizar y corregir las aberraciones hasta un sexto orden en la tabla 3.5 se puede apreciar dichas aberraciones [Tomás, 2014]

A continuación se describirán los tipos de aberraciones de alto orden las cuales están clasificadas de la siguiente manera:

- **Trefoil** es conocido como astigmatismo triangular siendo las aberraciones primarias, bidimensionalmente y representa el cambio de adelante y atrás de tres putos los cuales se encuentran estables se definen en un encorvamiento del plano partiendo de la periferia donde la imagen tridimensional generada por un frente de onda donde se retrasa y varían en tres momentos a partir de la periferia.
- **Coma** se denominan como una de las aberraciones más funestas encontradas en el espectro de aberraciones de alto orden, ya que el deterioro de la calidad visual siendo representada por su descubrimiento representa, al ser relacionado por un procedimiento rehabilitador.
- **El Tetrafoil** denominado es llamado astigmatismo cuadrático este defecto de refracción está ubicado en el cuarto orden, consiste en dos expresiones para obtener la frecuencia angular de seno y coseno de manera casi igual y ascendente, el trefoil es una aberración periférica la cual representa la simetría donde se encuentran cuatro puestos fijos expresados por la periferia, donde se observa su forma bidimensional



h!

Figura 3.6: Grafica tridimensional a color de los polinomios de Zernike y la ubicación de cada polinomio Fuente[de Souza Oliveira Filho, 2011][de Souza Oliveira Filho, 2011].

y tridimensional donde se muestra un frente de onda que avanza y luego se retaza en cuatro momentos de periferia donde se realiza un análisis del área.

- **Aberración esférica** se encuentra ubicada en el cuarto orden con un radio encontrado en la pirámide, y su frecuencia angular de orden cero la aberración simétrica es definida como la distancia focal, donde se encuentra los puntos del centro haciendo que la periferia del sistema se más curva de esta manera la aberración se hace mayor en la figura 3.6 se aprecia la pirámide y la ubicación de cada aberración.

Ubicada la pirámide para analizar la aberración que se presenta, tiende a bajar la calidad de la imagen analizada si está en la parte de arriba y se encuentre en el centro del eje se encuentra una aberración que tendrá un mayor impacto en la agudeza visual.

En la siguiente sección se tendrá el sensor de Harmann-Shack para el análisis y corrección de las aberraciones oculares, donde se determina un frente de onda aberrado.

3.0.2. El sensor de Harmann-Shack como medición de las aberraciones oculares.

El sensor de Harmann-Shack es empleado para la medición de un frente de onda o un área óptica, en la cual se demuestra por un espejo primario siendo comparado con la prueba Tschering, por lo que se hace la medición de los defectos de refracción en el globo ocular esta prueba es configurada por una pantalla que utiliza un arreglo de agujeros

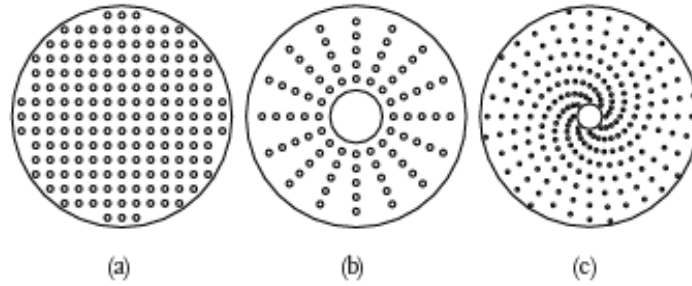


Figura 3.7: Descripción de los tres montajes en la prueba de Hartmann: (a) rectangular, (b) radial y (c) helicoidal.

los cuales son cuadrados, radiales o helicoidal en la figura 3.7 se puede observar dichos arreglos donde el más utilizado es el cuadrado que demuestra la forma que regula el frente de onda [Barbosa, 2012].

Por consiguiente se tiene la prueba básica de Hartmann fue empleada en astronomía para describir, una fuente lumínica que divergen en un frente de onda esférico, siendo emitido con un espejo de prueba en la figura 3.8 se puede observar como al llegar al espejo se encuentra un pantalla de Hartmann donde pasan los rayos de luz. Así la cantidad de rayas que pasan por la pantalla con agujeros, los rayos que alcanzan a llegar, estos son emitidos al espejo pasando de nuevo por los orificios y llegando a la pantalla de observación, la pantalla cumple con las siguientes características es oscura, se puede obtener por una pantalla fotográfica y un sensor ccd proveniente de una cámara de video, de esta manera se puede registrar un patrón de Hartmann el cual se puede observar en un diagrama de puntos [Barbosa, 2012].

Dichos puntos se encuentran en la mitad de la curvatura del espejo, por lo tanto en el espejo de primer orden, que cuenta con una forma esférica, parabólica e hiperbólica, de esta manera el sensor es colocado por fuera de la dirección de su eje y también es colocado por fuera o por dentro del foco, generando una solución para los puntos dados por el patrón de Hartmann.

Luego de encontrar la solución generada por el patrón de Hartmann el siguiente paso es calcular la medición del frente de onda aberrado, donde se hace la medición de las posiciones en las que se encuentran los puntos generados por el patrón los cuales se puede observar en la figura 3.8, estos puntos son construidos por un espejo principal y sus posiciones se comparan con los puntos producidos por el patrón de Hartmann, al hacer la

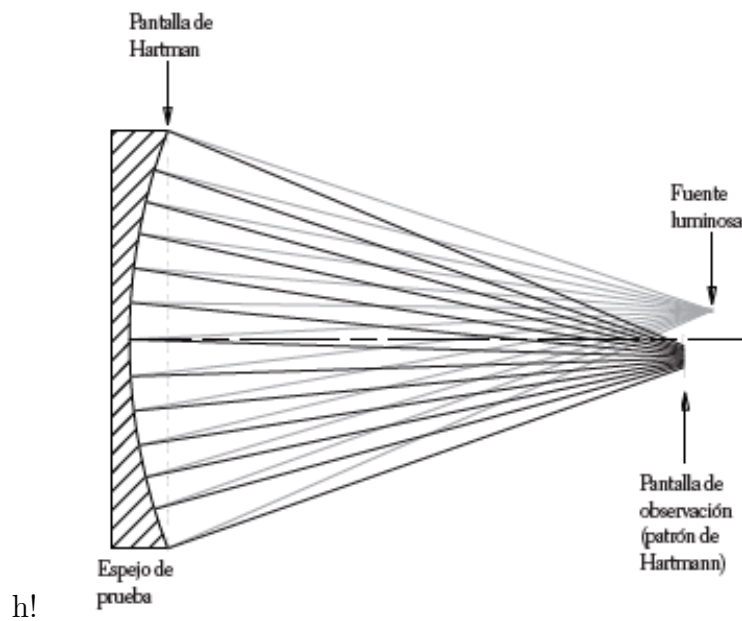


Figura 3.8: Presentación de un esquema básico de Hartmann el cual mide las aberraciones en un espejo astronómico

practica en un espejo ideal donde se realizan las pruebas [Tomás, 2014].

Al emplear la prueba de Hartmann se define el espejo ideal de forma experimental, disponiendo de manera física y numérica, el espejo por medio de la programación de trazos de los rayos ópticos. Donde se hace una simulación del área de un espejo ideal con la pantalla de Hartmann, en la siguiente figura[?] se puede observar un ejemplo donde se compara la ubicación de los puntos que son formados por el patrón, el cual se refiere a círculos y como se ubican los puntos del patrón teniéndose en cuenta la referencia en el cruce en los puntos de referencia generados por el sensor [Barbosa, 2012].

Con lo anterior se dice que al tener en cuenta los patrones generados se puede elaborar, la medida del desplazamiento que experimenta los puntos, los cuales son producidos por las pruebas. De esta manera se denomina el patrón de referencia como aberración de rayo, donde se puede hacer la medición del frente de onda y su pendiente se obtiene por el área óptica, además la prueba interpone la información dada por la pendiente, siendo está integrada y se reconstruye continuamente al generarse el frente de onda en la figura 3.9 se pueden observar los puntos de referencia.

por lo tanto el sensor de Harmann-Shack emplea un diodo que está compuesto por un (laser de sodio en estado sólido), emitiendo un haz de luz el cual es reducido al proyectarse

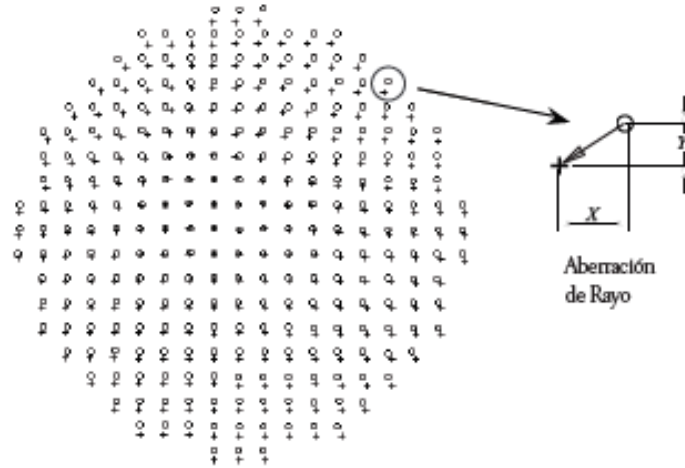
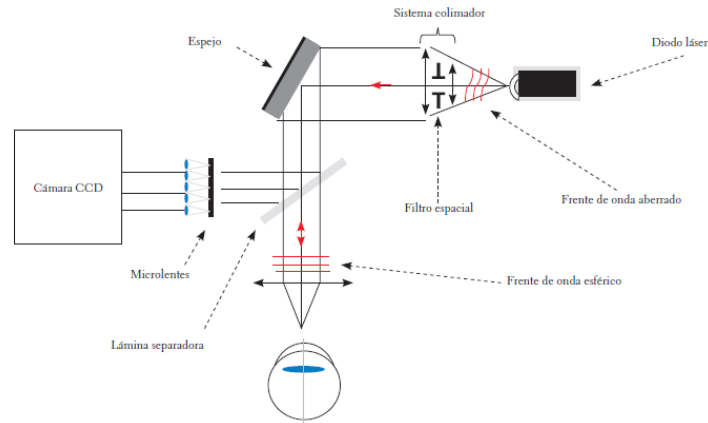


Figura 3.9: Puntos de referencia generados por el patrón de Hartmann (círculos) y (cruces). Donde la distorsión local de la superficie de prueba es medida por el corrimiento dado por los puntos y la posición por medio del patrón de referencia esto es llamada aberración de rayo.

en la retina[Tomás, 2014], de modo que al entrar al globo ocular no percibe ninguna aberración donde se halla presente solamente los fenómenos de la óptica ondulatoria, en otras palabras la difracción incide en el ojo un rayo de luz, laser $He - Ne$ y cuenta con una longitud de onda entre unos $(632,8nm)$ y un diámetro inferior de $2nm$ que emiten rayos luminosos lineales polarizados en la parte interior del globo ocular esto se puede observar en la figura 3.10, donde un haz de luz monocromático impacta en la retina este cambia en un frente de onda esférico, pasando por la estructura ocular que contiene aberraciones, pasa por un frente de onda aberrado a un frente de onda formado. Así que la intensidad eléctrica se acomoda para la irradiación en la córnea del paciente y no pasa de los $27\mu W/cm^2$, asimismo se tiene un filtro de densidad neutra siendo este capaz de regular los niveles del láser para que sean seguros[Tomás, 2014].

El sensor de Hartmann-Shack está compuesto por un microscopio con pínol, el cual mide $10mm$ de diámetro teniendo como propósito un filtrado especial $25\mu m$ generado por una fuente puntual luminosa, la cual viene siendo colimada por un doblete acromático que cuenta con una distancia focal de $200mm$.

El sistema colimador está ajustado a dos lentes que son el equivalente esférico del ojo humano, por donde atraviesa el doblete acromático el cual se dirige a un grupo de microlentes que producen un patrón reticular de puntos focales. Estos son conocidos como



h!

Figura 3.10: Se mide el frente de onda que emerge por medio de un modelamiento del globo ocular consiste en una fuente puntual lumínica en la retina, el frente de onda que se produce del modelamiento del ojo humano es muestreado el montaje de lentes y el plano del sensor de la CCD se produce un patrón de Hartmann, con el cual se puede hacer la reconstrucción de un frente de onda.

spots lumínicos generadores de un frente de onda plano, en este caso (ideal) obteniéndose una distribución perfecta y regular de los puntos luminosos.

De esta manera se podrá decir que el ojo humano estará sin ninguna aberración caso contrario con un ojo que presenta aberraciones, cuando la onda traspasa las microlentes hace que los spots se desplacen con respecto a la posición de referencia ideal, al hacer la captura de cada una de las imágenes producidas por los spots se hace la medición de su desplazamiento, en la figura[?] se observa la distribución perfecta de un frente

3.0.3. Defínice de un frente de onda.

El recorrido que toma la luz de un punto a otro es llamado haz de luz, esto implica que en un medio material homogéneo e isotrópico con un índice de refracción n , la luz que es generad por la fuente puntual tomara unas trayectorias radiales en todos los sentidos, esto quiere decir que el haz de luz en este caso viene siendo un conjunto de líneas rectas emitidas de la fuente puntal en la figura3.12 se puede apreciar algunos rayos que se ubican en un punto, de tal manera que el intervalo que existe entre S y el punto d por lo tanto es la distancia S que viene siendo nd , se debe tener en cuenta que la fuente emite innumerables rayos radiales en todas las direcciones situando sobre todos los rayos un



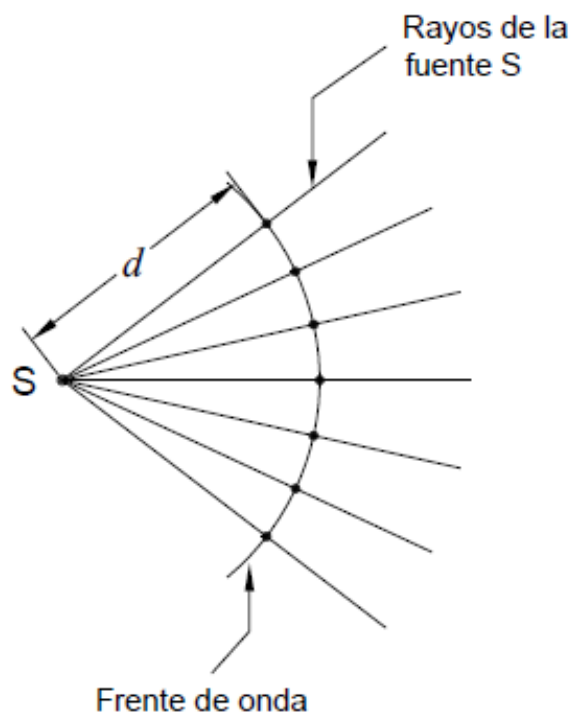
Figura 3.11: la organización exacta de los spots lumínicos con relación a un frente de onda plano el cual está libre de aberraciones[[Tomás, 2014](#)]

punto siendo este su distancia con respecto a S de la misma manera sea d , por lo tanto se pueden juntar todos los puntos por medio de una superficie, dicha superficie es esférica donde todos los rayos llegan ortogonales a ella generándose un frente de onda siendo este frente partícula por la distancia óptica nd [[Mejía, 2011](#)].

Una definición alterna a la dada anteriormente para el frente de onda es: Puntos del espacio que son alcanzados por la onda luminosa en un tiempo fijo, por lo tanto se encuentran a la misma fase de vibración de la perturbación[[Aristizábal and Restrepo, 2012](#)].

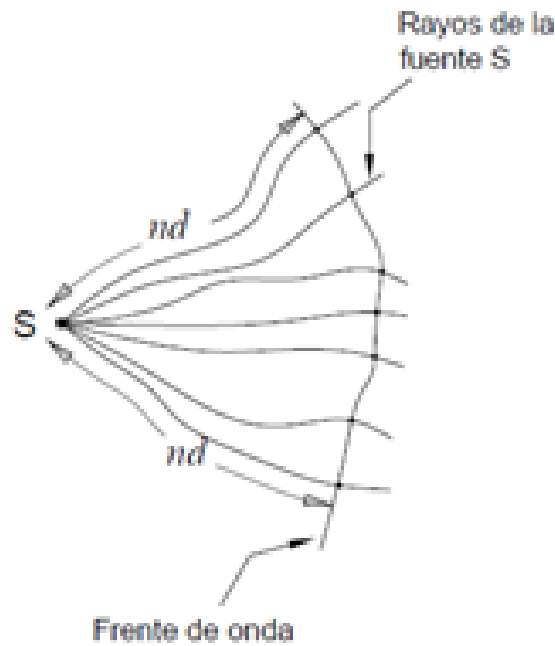
Por lo tanto si la fuente no se encuentra en un medio homogéneo el índice de refracción n deja de ser constante, y los rayos de luz seguirán trayectorias curvas. Aun, bajo esas circunstancias, la longitud del camino óptico sigue siendo nd . Así la superficie que agrupa los punto de los rayos que se encuentra a igual distancia óptica nd siendo igual a la constante de S dejando de ser una esfera sin una superficie de mayor complejidad, de la misma manera que en el caso homogéneo la superficie será perpendicular a los rayos, pese a que los rayos que provienen desde S hasta el frente de onda mantiene su misma distancia óptica, no es dispensablemente disponer la misma distancia física ya que la inhomogeneidades del medio de propagación, en la figura 3.13 se puede apreciar los rayos de luz que están asociados a una fuente lumínica.

Por consiguiente en la parte homogénea como la parte inhomogenio se puede establecer infinitos frentes de onda, solo cambiando las distancia nd se logra tener un nuevo frente



h!

Figura 3.12: Rayos de luz emitidos por una fuente puntual donde se observa un frente de onda, imagen tomada de [Mejía, 2011].



h!

Figura 3.13: Rayos de luz emitidos por una fuente puntual y un frente de onda para el caso de un medio material no homogéneo. Imagen tomada de [Mejía, 2011].

de onda en alguno de los casos, un frente de onda es fijado a una superficie donde algunos de sus puntos está relacionado con el mismos valor de la distancia óptica [Mejía, 2011].

Frente de onda aberrado

Para tener en cuenta un frente de onda como una aberración a nivel ocular que produce imágenes en la retina, sin tener nitidez y no son perfectas ya que la propagación no es la adecuada, denominándose aberración de frente de onda, en el cual se genera un frente de onda esférico en un sistema óptico [Mejía, 2011]. Es decir cuando el ojo afectado por una ametropía o en este caso no este afectado los rayos de luz siguen su misma trayectoria, produciendo una convergencia de manera conveniente y es considerada esférica libre de toda aberración [Tomás, 2014], de modo que genera imágenes en la retina donde cada rayo se focaliza en el punto imagen sin tener en cuenta la ubicación de la pupila. Sin embargo en cualquier sistema óptico se producen anomalías y no son completamente esféricas, el ojo humano presenta aberración, mostrando una diferencia de trayectorias por tanto una divergencia no adecuada de los rayos donde el frente de onda no sería totalmente esférico, de modo que al llegar un frente de onda al globo ocular este llegaría aberrado [Olarte, 2011].

Para caracterizar las aberraciones se debe tener en cuenta la diferencia en el frente de onda que se genera en un sistema esférico o de referencia, esta diferencia es llamada aberración de onda siendo el frente de onda la trayectoria óptica de un punto objeto[Olarte, 2011], donde los rayos de luz son perpendiculares presentando un sistema perfecto sin aberraciones, en donde se tiene un frente de onda esférico formador de imágenes claras en la retina, además cada rayo se focaliza de la misma manera que se focaliza en el plano imagen.

Dicho plano independiente a la posición de entrada de la pupila haciendo que la imagen este situada en un punto, de esta manera será deteriorada por la difracción dado a la naturaleza ondulatoria de la luz. Entonces el frente de onda deja de ser esférico y los rayo intercepta el plano imagen[Olarte, 2011], llegando a un punto diferente donde la altura de entrada depende de la pupila, siendo la imagen en la retina en forma de mancha borrosa haciéndose extensa y distorsionada generado un sistema óptico aberr[Artal et al., 2002].

3.0.4. Representación de un frente de onda desde los polinomios de Zernike.

Al hacer la descripción de un frente de onda los polinomios de Zernike son los ideales, ya que están definidos como un método estándar que describe una falla en el frente de onda y se hallan en un sistema óptico[Mejía, 2011].El cual es descrito por una función matemática que cumple un alto nivel de dificultad y pertenece a un grupo de funciones ortogonales[Vieyra and Hernández, 2006], por lo tanto sus propiedades están referidas por medio de las pupilas, siendo estas circulares y su frente de onda se puede deshacer por medio de los polinomios de Zernike[Tomás, 2014], considerados en dos dimensiones las cuales están ubicadas en coordenadas polares, $(\rho; \phi)$ de modo que se puede encontrar un producto de funciones angulares y radiales estos polinomios, como un conjunto hecho por bloques de descripción o construcción de cualquier frente de onda por más que este sea complicado.

Con lo anterior se puede decir que el valor obtenido está en el rango de 0 y 1 en cambio para θ , siendo la coordenada que tienen relación con el ángulo, se toman valores que van entre 0 y 2π donde cada polinomio cuenta con tres términos siendo esta la normalización que se halla entre un polinomio radial y los ángulos (sin o cos) donde se hace una representación general de los polinomios de Zernike, en una en una circunferencia de radio describiéndose

la ecuación 1 de manera que se emplea el doble índice (Z_{mn}) por lo tanto se dice que n es la representación del orden radial y m viene siendo la frecuencia angular, así que el subíndice n es positivo haciendo que su número mayor se encuentra en la potencia en el nivel más alto y el superíndice m adquiriendo valores entre los positivos y los negativos, por otro lado se tiene que al ser mayor el superíndice m se localiza demasiada periferia en la aberración[Mejía, 2011].

Siendo ρ y θ coordenadas polares, donde la función de radio se expresa en la siguiente ecuación:

$$Z_n^m = (\rho\theta) = \begin{cases} N_n^m R_n^m(\rho) \cos(m\theta) & m \geq 0 \\ -N_n^m R_n^m(\rho) \cos(m\theta) & m < 0 \end{cases} \quad (3.1)$$

siendo el subíndice n que indica el tipo de polinomio radial y el superíndice m determina la frecuencia angular, donde el factor denominación es llamado de la forma[Malacara, 2007]:

$$N_n^m = \{2(n+1/1 + \delta_{ij})\} \quad (3.2)$$

Con δ_{ij} siendo un delta de kronecker.

Donde la forma explícita del polinomio radial $R_n^m(\rho)$ Siendo este un polinomio de n de ρ y contiene los siguientes términos $\rho^n, \rho^{n-2}, \dots, \rho^m$ Se incluye un factor de normalización para dar garantía de la ortonormalidad, ya que los valores de m y n siempre van a ser números enteros y cumplen la condición expresada $m \leq n$

Siendo este un polinomio de n de ρ y contiene los siguientes términos $\rho^n, \rho^{n-2}, \dots, \rho^m$ se incluye un factor de normalización para dar garantía de la ortonormalidad pues se encuentra los valores que están en m y n , estos son constantes entre los números enteros los cuales cumplen con las condiciones generadas en $m \leq n$ esto se puede observar en la siguiente ecuación donde se describe el doble índice y se igual en términos de una raíz[Tomás, 2014].

$$N_n^m = \sqrt{2(N+1)1 + \delta_m 0} \quad (3.3)$$

En la tabla 3.14 se encuentran ubicados los polinomios de Zernike en sus respectivos niveles en este caso el cuarto orden, donde se localizan quince intervalos en coordenadas polares, y se relacionan con los índices j, n y m siendo representados por las aberraciones,

j = ÍNDICE	n = ORDEN	m = FRECUENCIA	$Z_n^m(\rho, \theta)$	NOMBRE ABERRACIÓN
0	0	0	1	Pistón
1	1	-1	$2\rho \sin(\theta)$	Tilt. Vertical
2	1	1	$2\rho \cos(\theta)$	Tilt. Horizontal
3	2	-2	$\sqrt{6}\rho^2 \sin 2(\theta)$	Astigmatismo vertical
4	2	0	$\sqrt{3}(2\rho^2-1)$	Desenfoque
5	2	2	$\sqrt{6}\rho^2 \cos 2(\theta)$	Astigmatismo H.
6	3	-3	$\sqrt{8}\rho^3 \sin 3(\theta)$	<i>Trefoil</i> vertical
7	3	-1	$\sqrt{8}(3\rho^3-2\rho) \sin(\theta)$	Coma vertical
8	3	1	$\sqrt{8}(3\rho^3-2\rho) \cos(\theta)$	Coma horizontal
9	3	3	$\sqrt{8}\rho^3 \cos 3(\theta)$	<i>Trefoil</i> horizontal
10	4	-4	$\sqrt{10}\rho^4 \sin 4(\theta)$	<i>Tetrafoil</i> vertical
11	4	-2	$\sqrt{10}(4\rho^4-3\rho^2) \sin 2(\theta)$	Astig. Secundario V.
12	4	0	$\sqrt{5}(6\rho^4-6\rho^2+1)$	Aberración esférica

h!

Figura 3.14: Los polinomios de Zernike y su descripción hasta el cuarto orden [Mochón, 2007]

por lo tanto se colocan los términos en una base de forma común y sus magnitudes se pueda comparar con facilidad, los polinomios Zernike son funciones básicas las cuales están ordenas de manera sistemática en una escala la cual tiene forma de pirámide como se puede observar la figura3.6

Dicha pirámide cuenta con una fila la cual vienen en un orden en un orden de componentes polinomiales, de la función, haciendo que las columnas correspondan a una frecuencia meridional siendo diferentes por norma de los armónicos en el estado del coseno el cual se encuentra en el estado de las frecuencias positivas y el estado del seno se encuentra en frecuencias negativas igualmente se puede encontrar de manera simple, la ubicación de las funciones polinomiales en la pirámide proporcionando un numero ordinal simple o de origen doble, el cual cuenta con un subíndice y un superíndice que explica donde se coloca con exactitud en la pirámide, de esta manera se debe tener en cuenta como se encuentran ubicada la pirámide para analizar la aberración que se presenta tiende a deteriorarse la calidad de la imagen, por lo tanto se analiza y se encuentra la parte superior de la

pirámide situándose en el centro, existe una aberración por lo que generaría un impacto de gran nivel en la agudeza visual[[Olarde, 2011](#)]

Capítulo 4

El aprendizaje activo como metodología de enseñanza para la construcción e implementación de un módulo, en un grupo de estudiantes del tópico física óptica en la Universidad Pedagógica Nacional.

En este capítulo se hablara sobre el aprendizaje activo en la enseñanza de la física con el fin de desarrollar una propuesta didáctica la cual será implementada en el aula.

4.1. ¿Qué es el aprendizaje activo?

Cuando se habla del aprendizaje activo se entiende como un conjunto de estrategias guiadas hacia los estudiantes, los cuales participan activa mente en clase, contrario al método clásico expositivo, donde el estudiante está limitado a atender, tomar apuntes y responder preguntas de lo expuesto por el docente. El aprendizaje activo permite llevar un proceso que compromete a los estudiantes a pensar en actividades y desarrollarlas de forma activa, sin que se limiten a solo acto de escuchar. En este proceso los estudiantes

son estimulados para debatir sobre temas de interés, cuestionarse, preguntar y aportar con sus conocimientos de manera que sea capaz de resolver problemas los se encuentran en su entorno y a si darles solución de una forma abierta y constante, de este modo desarrollara habilidades las cuales son del orden superior: crear, evaluar, analizar, aplicar, comprender y recordar [Sokoloff and Thornton, 1997]. También se encuentra preparado para divulgar lo que se ha venido aprendiendo en diferentes espacios. A partir de lo anterior, el aprendizaje activo está formado por dos componentes dependiendo del contexto y de quien lo vaya a utilizar [Sierra Gómez, 2013]: **Aprendizaje colaborativo y Aprendizaje cooperativo**

Se abarcan bastantes actividades en las cuales se puedan ver involucrados para discutir un tema en específico durante el desarrollo de la actividad propuesta en clase a lo largo del periodo.

El significado del aprendizaje activo está enfocado, en que los estudiantes se vean envueltos en algún tipo de dinámicas, expuestas en el aula con la finalidad de que el estudiante se mantenga ocupado, en lugar de estar en su puesto sólo prestando atención al docente que está dirigiendo la clase. Se tienen en cuenta dos factores muy importantes en el aula.

- Los estudiantes en el aula no son receptores pasivos, son aprendices activos.
- Los maestros nos son vistos como un sistema de información, sino como un instructor o mentor de conocimiento, al que se puede acudir para aclarar dudas.

Cuando se usan métodos en los cuales hay participación interactiva por parte de los alumnos son diseñados modelos, para promover la comprensión conceptual por medio de la participación de los estudiantes. Donde se vean rodeados por actividades en las cuales se vea el empeño en general que produzcan de manera inmediata información por medio de debates con sus compañeros y maestros [Hake, 2007]. Para emplear actividades diferentes a la enseñanza tradicional, se hará uso de herramientas que ofrece el Aprendizaje Activo de la Física, así se evaluaría una postura en la cual se hace de una investigación educativa

teniendo de los últimos veinte años [Sokoloff, 2006]. Se tiene en cuenta el Aprendizaje Activo de la Física como la unión de estrategias metodológica las cuales están diseñadas, para la enseñanza y el aprendizaje, de modo que el alumno es llevado a construir su conocimiento desde su propio entorno a partir de observaciones directas que se tienen del mundo físico [Sokoloff, 2006].

4.1.1. Aprendizaje Activo de la física

Cuando se proponen estrategias de investigación dirigidas a la educación para el desarrollo del aprendizaje, y en la enseñanza de la física para el avance de la ciencia cognitivas, a partir de lo anterior se puede observar un interés hacia los estudiantes que están activamente involucrados, en su proceso de formación educativa tanto en sus actividades de trabajo y laboratorio. Teniendo en cuenta la práctica de los estudiantes en grupos pequeños así con las clases de manera teórica, con grupos más grandes para, [Benegas et al., 2010] las clases demostrativas e interactivas. Donde los estudiantes están siempre intelectualmente activos, realizando predicciones, contrastando estas con los resultados del experimento demostrativo, y discutiendo con sus pares en el aula y con el docente.

Se tiene en cuenta que la enseñanza tradicional ha obtenido cifras significativas de bajo rendimiento académico, de los estudiantes en la física de modo que con exactitud, como consiste el aprendizaje activo en la educación, se concibe el aprendizaje activo de la física como un conjunto de herramientas metodológicas, las cuales están dadas para la enseñanza de las ciencias exactas, para [Orozco Martínez, 2012] donde los alumnos son guiados a construir sus conceptos físicos desde las observaciones del mundo físico que los rodea

Se puede decir que la investigación en la educación ha venido mostrando que los alumnos cuando estudian un tema, están dispuestos a trabajar, teniendo una noción completa del trabajo que va a abordar desarrollando actividades donde hay observación experiencias que nos rodean a diario. De este modo es importante y así obtener una mejor comprensión significativa de los procesos que se han venido trabajando, para [Benegas et al., 2010] estas estrategias de aprendizaje guiadas a los estudiantes, en la construcción de su conocimiento de la observación directa del mundo real.

Figura 4.1: Comparación entre los entornos educativos: Aprendizaje pasivo y Aprendizaje activo [Orozco Martínez, 2012]

El cual se puede hacer alusión la predicción, observación, la discusión y síntesis (PODS) así los estudiantes, encuentra las diferencias en las creencias que se dan en el aula dándole paso a la física y las leyes que están en el mundo físico. El modelo del aprendizaje activo muestra de forma considera, el procesos científico desarrollado en el aula haciendo que se creen buenas habilidades de razonamiento físico, en la tabla 4.1 se puede apreciar las características donde se observa los diferentes entornos del aprendizaje activo y a su vez del pasivo.

¿Por qué Aprendizaje Activo?

El aprendizaje activo de la física ha tenido un fuerte desarrollo en el transcurso de la última década y se ha demostrado, en Estados Unidos y en países desarrollados para mejorar la manera de comprensión por parte de los estudiantes, los cuales tienen conceptos básicos de la física. Al aplicar estrategias que van de la mano con el aprendizaje, los estudiantes son inducidos a la construcción de sus conocimientos y obtener más comprensión de la física en experiencias y observaciones directas del mundo físico que lo rodea [Sokoloff, 2006].

¿Porque la óptica y la fotónica?

La UNESCO escogió como plan para desarrollar estudios sobre los talleres de la óptica y la fotónica, dado a que es el área emergente en la física moderna, siendo relevante y su adaptabilidad en la investigación para la educación en los países en desarrollo, el material con el que se hacen las experiencias en el laboratorio es de fácil acceso y su reproducción es de bajo costo. La fotónica se desarrolla en los temas geométricos y físicos ya que los maestros en los países en desarrollo Priscilla [Laws, 2008].

Al hacer una explicación breve del Aprendizaje Activo y su relación con la física, en la siguiente sección se realizara el modulo el cual está ligado a estos temas pero en este caso se fijara en los de refracción y el uso de las lentes para para que el estudiante al

interactuar con el montaje y la guía sea capaz de enfrentarse a los problemas propuestos dando solución con el uso de las lentes divergentes y convergentes para que al final sepa que es un defecto de refracción como lo es la miopía o la hipermetropía y de qué manera se corrigen , por lo tanto se implementara un módulo en el tópico de física óptica dictado en el departamento de física de la Universidad Pedagógica Nacional.

4.1.2. Diseño del módulo a implementar

Este módulo está construido desde el aprendizaje activo para un grupo de estudiantes del tópico óptica física de la Universidad Pedagógica Nacional, con la finalidad de enseñar la base del trabajo de grado, la cual esta enfocada en los defectos de refracción miopía e hipermetropía a partir de la óptica geométrica de esta manera los estudiantes aprenderán como se forma la imagen en el globo ocular cuando se encuentra libre de defectos y cuando es afectado por unos de ellos, por consiguiente se tomaran grupos de cuatro estudiantes entregándoseles una guía que cuenta con dos parte la experimental y la teórica, con la finalidad de que el líder del grupo haga el trabajo en equipo puedan dar solución a los problemas planteados tal como se plantea desde el aprendizaje activo.

A continuación se presentara la estructura que se ha venido planteando para cada una de la secciones, y así llevar a cabo esta estrategia, donde se conocerán los nombres de cada sección, la temática, los objetivos y las actividades propuestas las cuales se podrán encontrar en los anexos la metodología y el tiempo estimado para cada actividad.

Sección I “montaje experimental”(banco óptico)

Temática:

1. Defectos refractivos.
2. Corrección de los defectos refractivos.
3. Lentes divergentes y

Objetivos:

1. Encontrar las trayectorias que toman los rayos cuando llegan a la lente semicircular.
2. Identificar como se posan los rayos de luz cuando hay un defecto refractivo.



Figura 4.2: Desarrollo del montaje experimental



Figura 4.3: Análisis del montaje experimental.

3. Utilizar las lentes semicircular y cóncava cuando pasan los raras de luz.

Actividades Propuestas

En primer lugar, se va a identificar la trayectoria de los rayos de luz emitida por una fuente al pasar por una doble rendija, y estos llegan a una lente colocada en el disco de Harhl, (Ver en: Anexos Guía 1) luego se hacen cinco grupos donde se les entregara el equipo del Banco Óptico, donde hallaran los rayos de luz cuando llegan a un ojo norma y cuando es afectado por un defecto de refracción, después utilizaran en primera instancia una lente cóncava para mirar la corrección de la miopía cuando los rayos luminoso, pasan por la lente y se colocan de forma adecuada en la retina y así mismo se coloca una lente semicircular cóncava, para mirar la corrección de la hipermetropía esta sección consta de una hora para que los estudiantes interactúen con la parte experimental.

Resultados esperados



Figura 4.4: Desarrollo de la parte teórica.

1. Reconocer los defectos refractivos. 2. Determinar con qué tipo de lente diverge de manera correcta la luz. Tiempo estimado una hora.

Section II “test conceptual”

Temáticas:

1. Describir el paso de la luz cuando llega al ojo con corrección.
2. Identificar qué clase de lente se debe usar en el caso de la miopía e hipermetropía .
3. Reconocer que ley de la óptica geométrica se observa en ojo humano.

Actividades propuestas

En este caso se aplicara un test conceptual que consta de nueve preguntas y será resuelto de manera individual por los alumnos, las temática de la primera sección, luego se identificara las nociones que tienen los estudiantes frente a los defectos refractivos y su corrección desde la óptica geométrica a partir de esto se hará una sistematización donde se encontrara lo aprendido por los estudiantes en la parte experimental y en la parte conceptual para reafirmar sus conocimiento. Resultados esperados:

1. Describir de manera adecuada cuando el ojo es normal y cuando es afectado por algún defecto refractivo.
2. 2. Idéntica para que sirven las lentes y el uso adecuado que se deben dar al momento de tener un problema visual tiempo estimado de una hora.

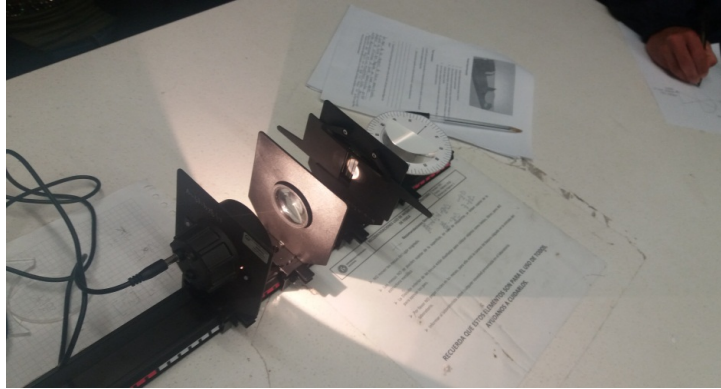


Figura 4.5: Desarrollo de la parte teórica.

Con la implementación de dicho modulo se busca fortalecer los conocimientos en óptica y que conozcan algo nuevo los estudiantes del tópico óptica física, ya que en la licenciatura ofrecen esta asignatura cada dos años ya que en nuestro pensum no está como materia obligatoria haciendo que el tema no sea muy conocido.

A partir de lo anterior se hizo un análisis de las pruebas realizadas a los trece estudiantes que participaron, para saber su comprensión con los defectos refractivos y su corrección por medio de lentes divergentes y convergente arrojando los siguientes datos.

1. Prueba 1: los estudiantes desarrollaron satisfactoriamente el montaje experimental, pero no tenían muy claro el concepto de defecto refractivo haciendo que se equivocaran un poco, pero al final pudieron realizar la experiencia de manera satisfactoria.
1. Prueba 2: los estudiantes realizaron un test el cual consta de nueve preguntas relacionadas con el montaje experimental, donde se iban a indagar como y porque se dan los defectos. De modo que estos conllevan a una corrección con las lentes, de esta manera los estudiantes respondieron satisfactoriamente el test ya que con la experiencia en el banco óptico obtuvieron conocimientos previos para responder las preguntas y a su vez fortalecer sus conocimientos en dicho tema.

4.1.3. Reflexiones finales

A partir de la construcción, diseño e implementación del módulo didáctico el cual aborda temas de los defectos refractivos y su relación con la óptica geométrica surgieron las siguientes reflexiones:

- Es importante llevar estos temas al aula ya que en la Licenciatura en Física de la Universidad no se encuentra la Óptica Física como materia obligatoria en el ciclo de profundización.
- Uno de los errores evidenciados en la aplicación del módulo fue el temor de los estudiantes a preguntar y responder sobre los temas que estaban propuestos en las dos actividades. No obstante, esto generó que se cuestionaran bastante para el desarrollo de la guía.
- Los estudiantes del tópico óptica física trabajaron en grupo haciendo todo en equipo, así el trabajo fue colaborativo y cooperativo, donde los estudiantes se escuchaban entre si sus ideas propuestas, sin tener que guiarse de manera constante del docente. En otras palabras los compañeros de grupo son importantes para el desarrollo de las actividades propuestas.
- Al realizar la actividad se pudo evidenciar en cada grupo cómo aceptaron las temáticas propuestas, desarrollando su propio aprendizaje sintiéndose emocionados con la experiencia con el banco óptico.
- Los resultados arrojados por la prueba muestran un nivel alto por parte de los estudiantes, ya que al principio tuvieron algunos inconvenientes en la construcción del montaje, pero al finalizar la prueba obtuvieron los logros importantes. Siendo estos la interpretación de los defectos refractivos miopía e hipermetropía, donde los relacionaron con la óptica geométrica haciendo que la prueba fuese de gran desempeño para ellos.
- Los resultados arrojados en la primera parte de la guía son satisfactorio ya que los estudiantes, llegaron a observar los defectos refractivos con el montaje experimental, donde los cuatro grupos dieron resultados positivos de un 100 % logrando desarrollar la actividad satisfactoriamente.
- En la segunda parte de la guía donde se realizó un test conceptual los estudiantes tuvieron inconvenientes, haciendo que al responder las nueve preguntas se confundieran un poco, pues no tuvieron en cuenta que tipos de lentes se debían usar para la

corrección de la miopía e hipermetropía. Donde los resultados fueron de un 95 % satisfactorios y el 5 % fue negativo, de acuerdo con estos resultados el margen de error fue mínimo y el desarrollo del aprendizaje en los estudiantes fue de gran ganancia.

Conclusiones

Al estudiar el fenómeno de la visión desde la óptica geométrica se determina cómo se forman las imágenes en el globo ocular. Existen anomalías que alteran las imágenes en el ojo denominadas defectos de refracción o aberraciones (miopía, hipermetropía y astigmatismo) y cada una de ellas con características bien definidas. Para la corrección de estos defectos se hace uso de lentes divergentes, convergentes y en caso del astigmatismo, se utiliza una lente cilíndrica.

Por otra parte, se describen las aberraciones ópticas asociadas con las ametropías por medio de los polinomios de Zernike, permitiendo clasificar las aberraciones en bajo y alto orden. Al utilizar los polinomios se hace una descripción de un frente de onda y se considera un método estándar que determina una falla en un sistema óptico.

Se realiza un módulo desde el aprendizaje activo que cuenta con dos componentes experimental y conceptual, considerando como tema principal los defectos refractivos desde la óptica geométrica. Se implementó a estudiantes del tópico óptica física de la Universidad Pedagógica Nacional, a fin de afianzar sus conocimientos sobre óptica geométrica para que logren una mayor comprensión sobre defectos de refracción que aquejan al globo ocular.

Se puede decir que la prueba diseñada “Módulo de Óptica Geométrica” para mí como docente de física en formación, ha sido un gran trabajo ya que he llevado al aula un tema que es muy poco enseñado, por lo tanto considero que es un mecanismo de entendimiento para los demás, afianzando sus conocimientos en óptica geométrica y en los defectos de refracción en el ojo humano, también puedo decir que pude realizar este módulo con los equipos que están en el departamento de física, donde los costos fueron mínimos, ya que

el objetivo de la práctica experimental era hacer uso del material que se encontraba en el laboratorio.

Al hacer la relación de la óptica geométrica con el sistema visual en este caso el ojo humano, se desarrolla una temática fisicomatemática que con lleva a plantear y explicar brevemente las bases de la óptica geométrica, los tipos de lentes que se utilizan para estudiar la trayectoria de la luz. Dicha trayectoria es percibía por el globo ocular como un rayo luminoso que forma la imagen de manera correcta en la retina. Pero el ojo humano esta propenso a defectos de refracción los cuales son generados por la elongación de la córnea.

Así que se empleó una descripción teórica la cual hace una compaginación entre la óptica geométrica y los defectos de refracción, para que así el lector pueda tener una mayor comprensión sobre el tema entendiendo cómo los rayos de luz llegan a un ojo emétrope, es decir, libre de defectos y comprenda cuando un haz de luz llega de manera incorrecta a la retina.

De acuerdo con los razonamientos que se han venido realizando se tiene la descripción de un frente de onda aberrada, desde los polinomios de Zernike para obtener un entendimiento más a profundidad sobre el tema.

Finalmente se empleó la metodología de enseñanza del aprendizaje activo de la física AAF que se muestra como una de las tantas maneras de enseñanza de la física haciendo que el estudiante avance en su aprendizaje de forma autónoma.

Apéndice A

Anexo: Módulo

Universidad Pedagógica Nacional

Facultad de ciencia y tecnología

Departamento de física

Línea de profundización

La enseñanza de la Física y la Relación Física Matemática

Modulo Óptica Geométrica

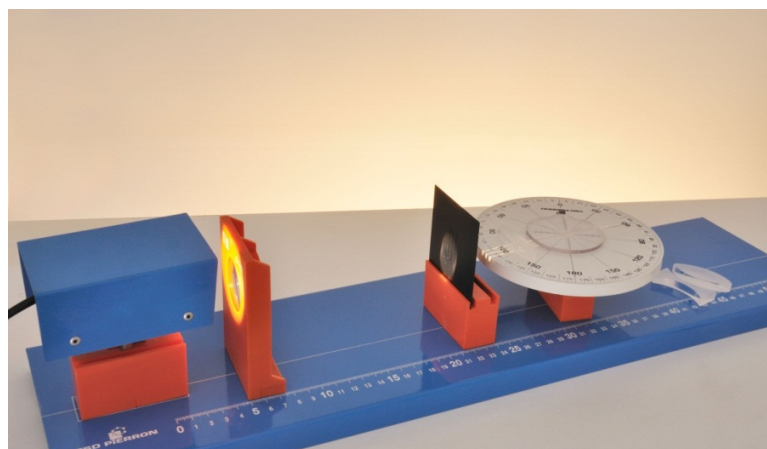
A partir de la óptica geométrica se puede corregir defectos de refracción por medio de lentes divergentes y convergentes las cuales ayudan a focalizar los rayos de luz de manera correcta en la retina.

Objetivo

Estudiar los rayos de luz que inciden en una lente semicircular y así observar los defectos de refracción y su corrección con lentes divergentes y convergentes.

Materiales a usar

1. Banco óptico
2. Fuente de luz
3. Rejilla
4. lente
5. Disco de Harhl



Parte Experimental

1. Halle la distancia focal de la lente j al disco j'
2. Coloque la lente semicircular
3. Gire el disco hacia las mesillas del reloj y observe como divergen los rayos
4. Ahora coloque frente de la lente semicircular, la lente convexa y describa que sucede al colocar la lente.
5. De la misma coloque la lente semicircular cóncava sobre el disco y describa lo que sucede al colocar la lente.

Test conceptual

A partir de la experiencia obtenida en el laboratorio con el banco óptico y el disco de Harhl conteste las siguientes preguntas.

1. ¿Para usted que significa los defectos refractivos? explique brevemente

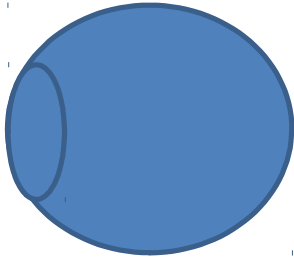
2. Al pasar la luz por la lente que estar sobre el disco de Hartl ¿de qué manera llagan los rayos?

3. ¿A partir de lo anterior describa la miopía y su corrección, al colocar una lente convexa al frente de la lente semicircular?

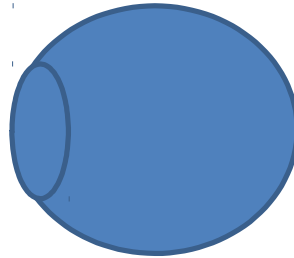
4. ¿Describa la hipermetropía y su corrección, al clocar una lente semicircular cóncava al frente de una lente semicircular?

5. En las siguientes figuras del ojo humano, trace la trayectoria de los rayos de luz que llegan de manera correcta a un ojo normal.

De la misma manera trace la trayectoria de los rayos de luz que llegan de manera incorrecta a un ojo afectado por la miopía.



Ojo normal

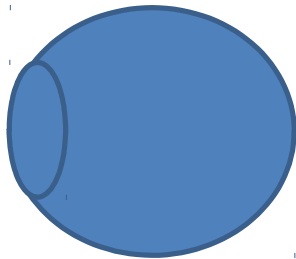


Ojo afectado.

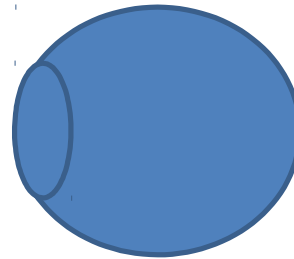
- Explique ¿qué sucede en las diferentes trayectorias que recorren los rayos en las figuras?

6. En las siguientes figuras del ojo humano, trace la trayectoria de los rayos de luz que llegan de manera correcta en un ojo normal.

De la misma manera trace la trayectoria de los rayos de luz que llegan de manera incorrecta a un ojo afectado por la hipermetropía.



Ojo normal.



Ojo afectado.

- Explique ¿Explique qué sucede en las diferentes trayectorias que recorren los rayos en las figuras?

7. Desde la óptica geométrica ¿cuál ley explica los defectos refractivos?

8. Explique brevemente ¿cómo se forma la imagen en el ojo humano con la experiencia obtenida con el banco óptico?

9. ¿Qué conocimientos obtuvo mediante las experiencias dadas en la parte experimental y teórica?

Bibliografía

- [Arancón et al., 2014] Arancón, C., Montaner, S., and Plá, B. (2014). El ojo humano y sus defectos. 29, 30, 31
- [Aristizábal and Restrepo, 2012] Aristizábal, D. and Restrepo, R. (2012). Notas sobre física de oscilaciones ondas y óptica. 6, 16, 43
- [Artal et al., 2002] Artal, P., Fernández, E. J., and Manzanera, S. (2002). Are optical aberrations during accommodation a significant problem for refractive surgery? *Journal of refractive surgery*, 18(5):S563–S566. 33, 46
- [Atchison and Smith, 2000] Atchison, D. A. and Smith, G. (2000). Optics of the human eye. 21, 30
- [Barbosa, 2012] Barbosa, Y. M. (2012). La prueba de hartmann en ciencias de la visión. *Ciencia & Tecnología para la Salud Visual y Ocular*, 10(1):149–165. 39, 40
- [Benegas et al., 2010] Benegas, J., Zavala, G., Gangoso, A. G., and Truyol, M. E. (2010). Reporte del 3er. taller regional del cono sur sobre aprendizaje activo: Mecánica (aaeym-córdoba 2010) y la 3ra. conferencia regional del cono sur sobre aprendizaje activo de la física (craaf-3). *Lat. Am. J. Phys. Educ. Vol*, 4(3):776. 52
- [Benito, 1998] Benito, J. V. S. (1998). *Manual de óptica geométrica*. Editorial Club universitario. IV, 8, 10, 12, 18, 21, 22
- [Cornejo Rodríguez, 2006] Cornejo Rodríguez, Alejandro y Urcid Serrano, G. (2006). Óptica geométrica resumen de conceptos y fórmulas parte i. Technical report, INAOE. III, III, III, IV, 5, 6, 7, 8, 18

- [de Souza Oliveira Filho, 2011] de Souza Oliveira Filho, K. (2011). Teoria das aberracoes óticas. IV, 38
- [Dorronsoro et al., 2003] Dorronsoro, C., Barbero, S., Llorente, L., and Marcos, S. (2003). On-eye measurement of optical performance of rigid gas permeable contact lenses based on ocular and corneal aberrometry. *Optometry & Vision Science*, 80(2):115–125. IV, 34
- [Fernández and Fernández, 2001] Fernández, G. T. and Fernández, M. T. (2001). Errores refractivos y sus implicaciones genéticas. 25, 27, 29
- [Figueras Atienza, 2013] Figueras Atienza, M. (2013). *Óptica geométrica La óptica sin ondas*. Universitat Oberta de Catalunya. 5, 15
- [Gomez, 2010] Gomez, J. (2010). Apoyo para la preparación de los estudios de ingeniería y arquitectura @ONLINE. 23
- [Gómez González, 2006] Gómez González, E. (2006). Guía básica de conceptos de óptica geométrica. 21, 22, 24
- [Goodman, 2010] Goodman, D. (2010). *Handbook of Optics, Volume I: Geometrical and Physical Optics*, chapter Geometric Optics. 6
- [Guzmán Martín et al., 2008] Guzmán Martín, A., Hernández Vidal, M. J., Martínez Martínez, M., Martínez Trinidad, M., and Noguera Moltó, C. (2008). Comisión de oftalmología medicina 2007/08. 23, 29
- [Hake, 2007] Hake, R. (2007). Six lessons from the physics education reform effort. *Latin American Journal of Physics Education*, 1(1):24–31. 28, 51
- [Hecht, 2002] Hecht, E. (2002). *Optics*. Addison-Wesley. 5, 7, 16, 17, 25
- [Laws, 2008] Laws, P. W. (2008). A lens into the world. *AAPT Interactions*, 38(1):20–23. 53
- [Lipson et al., 2010] Lipson, A., Lipson, S. G., and Lipson, H. (2010). *Optical physics*. Cambridge University Press. 5

- [Malacara, 2007] Malacara, D. (2007). *Optical shop testing*, volume 59. John Wiley & Sons. 47
- [Mejía, 2011] Mejía, Y. (2011). El frente de onda y su representación con polinomios de zernike. *Ciencia & Tecnología para la Salud Visual y Ocular*, 9(2):145–166. v, 43, 45, 46, 47
- [Olarte, 2011] Olarte, R. V. (2011). Entendiendo e interpretando las aberraciones ópticas. *Ciencia & Tecnología para la Salud Visual y Ocular*, 9(2):105–122. iv, 32, 33, 34, 35, 36, 45, 46, 49
- [Orozco Martínez, 2012] Orozco Martínez, J. (2012). El aprendizaje activo de la física en los cursos en línea del ipn. *Revista Mexicana de Bachillerato a Distancia*, 4(7). v, 52, 53
- [Palomo, 2003] Palomo, Catalina y Cuina, R. y. G. (2003). *El dioptrio ocular*, chapter 2. Sociedad Española de Oftalmología. 24, 25
- [Puell Marín, 2006] Puell Marín, M. (2006). *Óptica Fisiológica: el sistema óptico del ojo y la visión binocular*. Madrid. M? Cinta Puell Marín es profesora titular del departamento de Óptica II (Optometría y Visión) de la Universidad Complutense. 21
- [Sierra Gómez, 2013] Sierra Gómez, H. (2013). Aprendizaje activo como mejora de las actitudes de los estudiantes hacia el aprendizaje. 51
- [Silvia and Martin, 2013] Silvia, Comastri, B. K. and Martin, G. (2013). *Aberometrías oculares y de otros sistemas ópticos: transformación de coeficiente de Zernike al contraer ydesplazar transversalmente la pupila*. Facultad de Ingeniería, Departamento de investigaciones. Universidad de Belgrano, Buenos Aires. 34
- [Sokoloff, 2006] Sokoloff, D. R. (2006). *ACTIVE LEARNING IN OPTICS AND PHOTONICS. TRAINING MANUAL*. UNESCO, 1 edition. 52, 53
- [Sokoloff and Thornton, 1997] Sokoloff, D. R. and Thornton, R. K. (1997). Using interactive lecture demonstrations to create an active learning environment. In *AIP Conference Proceedings*, volume 399, pages 1061–1074. AIP. 51

- [Thibos et al., 2002] Thibos, L. N., Applegate, R. A., Schwiegerling, J. T., and Webb, R. (2002). Standards for reporting the optical aberrations of eyes. *Journal of refractive surgery*, 18(5):S652–S660. IV, IV, 36
- [Tomás, 2014] Tomás, J. (2014). Aberrometría ocular: aplicaciones clínicas y limitaciones de los sensores de frente de onda. *Ciencia y Tecnología para la Salud Visual y Ocular*, pages 93–105. v, 34, 36, 37, 40, 41, 43, 45, 46, 47
- [Vieyra and Hernández, 2006] Vieyra, A. G. and Hernández, D. M. (2006). Reconstrucción de frentes de onda con datos interferométricos utilizando polinomios de cuasi-zernike. *mathesis*, Centro de investigaciones en óptica. 46
- [Young et al., 2009] Young, H., Sears, F., Freedman, R., Zemansky, M., Ford, A., Brito, J., Flores, V., and Leal, R. (2009). *Física universitaria con física moderna 12ED. Volumen II*. Number v. 2 in Física universitaria. Pearson Educación. 29