



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE PUEBLA**

**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO
MATEMÁTICAS**

**LENSÓMETRO DE AUTOCOLIMACIÓN
USANDO LA PRUEBA DE RONCHI**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

LICENCIADO EN FÍSICA

PRESENTA:

SANTIAGO CRUZ PONCE

DIRECTORES: ALBERTO CORDERO DÁVILA

JORGE GONZÁLEZ GARCÍA

PUEBLA, PUE.

MARZO 2021



*Por todo el apoyo incondicional y sabios consejos de mi padre.
A mis hermanas: Marisol, Claudia y Norma.
Por todo el amor inconmensurable y deliciosa comida de mi madre.
Mamá, tu bondad y tu amor me seguirán todos los días de mi vida.
Que aunque duermas siempre, tus ojos me pueden mirar,
desde el cielo nunca me dejes de cuidar...*

II

Este trabajo de investigación se realizó mediante el estímulo económico entregado por medio de la beca: Ayudante de investigador, Sistema Nacional de Investigadores Nivel III; otorgada por CONACYT gracias al Doctor Alberto Cordero Dávila.

Agradecimientos

Al Dr. Alberto Cordero Dávila: por su sapiencia, apoyo, motivación, paciencia y todo el vasto tiempo invertido para la realización de esta tesis.

Al Ingeniero Fernando Vega, Augen Ópticos: por facilitarnos su lensómetro profesional, regalarnos lentes oftálmicas de diversos tipos, medirlas y asesorarnos sobre optometría.

Al Optometrista Bernardo Hernández Juárez, Servicios Especializados en Optometría, por regalarnos lentes oftálmicas de diversos tipos, medirlas y asesorarnos sobre optometría.

Al C. Noé Cuautle Tépo, Técnico en el Taller de Óptica y Taller Mecánico, FCFM (BUAP), por su total disposición y ayuda en los conceptos mecánicos que llevaron a la realización del Lensómetro de autocolimación.

Al C. Jaime Pimentel Ximello, Técnico en el Taller de Óptica y Taller de pulido, FCFM (BUAP), por su total disposición y ayuda en los conceptos mecánicos que llevaron a la realización del Lensómetro de autocolimación.

Resumen

En la presente tesis se muestra el diseño, construcción y resultados obtenidos de un nuevo lensómetro con autocolimación para medir las potencias refractivas de lentes oftálmicas (esféricas, cilíndricas, bifocales y progresivas), el cual se desarrolló en el Laboratorio de Pruebas Ópticas de la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. El proyecto constó básicamente en dos etapas: La primera parte consistió en la construcción de un lensómetro de laboratorio, basándose en el montaje experimental del lensómetro tradicional, posteriormente se implementaron mejoras en el sistema que dio como resultado el paso a la segunda etapa, la cual se basa en la modificación del montaje experimental del lensómetro tradicional. La autocolimación y la prueba de Ronchi se hacen presentes al momento de realizar las modificaciones, que es de dónde se parte la realización del nuevo lensómetro propuesto. La base del sistema es similar al usado para probar espejos cóncavos en la prueba de Ronchi, sólo que en este caso se cambia el espejo cóncavo por un arreglo formado por un espejo plano de alta calidad y la lente a probar. El plano focal fue identificado cuando no se observan manchas o cuando se observa un mínimo número de manchas en los bironchigramas obtenidos (patrón con una rejilla cuadrada de Ronchi). Para las lentes cilíndricas se observaron franjas a lo largo de la dirección de x y y , de las cuales fueron obtenidas las potencias cilíndricas y esféricas. Para las lentes progresivas un área de cero manchas se desplaza sobre el plano del bironchigrama

a lo largo de la zona umbilic, mientras la rejilla cuadrículada de Ronchi es movida a lo largo del eje óptico. Se destacan las ventajas del nuevo montaje experimental como son: compactación del sistema, menor costo y mejor caracterización de cada lente oftálmica, esta caracterización ejemplifica claramente las propiedades de cada tipo de lente oftálmica medida. Nuestras mediciones y errores fueron bastante similares a los datos obtenidos con un lensómetro comercial.

Índice general

Agradecimientos	V
Resumen	VII
Lista de figuras	XI
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Óptica y el ojo	1
1.2. Errores de refracción.	3
1.3. Corrección de los errores de refracción	5
1.4. Lentes oftálmicas	7
2. CRITERIOS Y MÉTODOS ÓPTICOS IMPLEMENTADOS EN EL NUEVO LENSÓMETRO	11
2.1. Lensómetro convencional	11
2.2. Método de autocolimación	14
2.3. Prueba de Ronchi	15
2.4. Criterio de mínimo número de manchas	17
2.5. Pruebas ópticas en ciencias de la visión.	18
3. NUEVO ARREGLO EXPERIMENTAL	21
3.1. Montaje experimental	21
4. RESULTADOS EXPERIMENTALES	23
4.1. Lentes monofocales	23
4.2. Lentes cilíndricas.	24

4.3. Lentes bifocales	27
4.4. Lentes progresivas	28
5. ANÁLISIS DE ERRORES	31
6. CONCLUSIONES	35
A. PUBLICACIÓN Y PATENTE DEL LENSÓME- TRO DE AUTOCOLIMACIÓN.	37

Índice de figuras

1.1. Esquema anatómico del ojo humano. (Imagen de [4])	2
1.2. Ojo miope. (Imagen de [4])	4
1.3. Ojo hipermetrope. (Imagen de [4])	4
1.4. Ojo con astigmatismo. (Imagen de [4])	5
1.5. a) Ojo miope corregido, b) Ojo hipermetrope corregido. (Imagen de [4])	8
1.6. Lente cilíndrica	9
2.1. Esquema de un lensómetro. (Imagen de [4])	12
2.2. Arreglo lente convergente-lente oftálmica.	13
2.3. Lensómetro comercial (Imagen de [4])	14
2.4. Ronchigrama de un frente de onda esférico, A' es el centro de curvatura paraxial; O'' es el plano de la rejilla localizado a lo largo del eje óptico; O' es el plano de la pupila de salida o la superficie bajo el plano de prueba. (Imagen de [6])	16
2.5. Criterio de mínimo número de manchas. La rejilla se va desplazando hasta observar una imagen con un mínimo número de manchas, como se muestra en la figura.	18
3.1. Diagrama del lensómetro con autocolimación y rejilla cuadrículada de Ronchi.	22
3.2. Fotografía del montaje experimental	22
4.1. Bironchigramas de una lente oftálmica positiva.	24

4.2. Bironchigramas de una lente oftálmica negativa.	24
4.3. Bironchigramas de una lente cilíndrica.	25
4.4. Tabla comparativa, lente cilíndrica (potencia esférica).	26
4.5. Tabla comparativa, lente cilíndrica (potencia cilíndrica).	27
4.6. Diagrama de una lente bifocal	28
4.7. Bironchigrama de una lente bifocal.	28
4.8. Diagrama de una lente progresiva.	29
4.9. Bironchigrama de una lente progresiva	29
5.1. Configuración del lensómetro comercial: a)Esquema, b)Fotografía.	32
5.2. Configuración del lensómetro autocolimado: a)Esquema, b)Fotografía.	33
5.3. Tabla comparativa de potencias.	33
A.1. Artículo publicado	38
A.2. Solicitud de patente de invención.	39

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

Antes de entrar de lleno en el tema principal de esta tesis, se considera necesario dar algunos conceptos básicos pero importantes para el entendimiento general de la misma, conceptos que se encuentran dentro del campo de la oftalmología y la optometría, para después dar paso a los errores de refracción, enfocándonos en la corrección de dichos defectos usando de lentes oftálmicas.

1.1. Óptica y el ojo

El globo ocular [1] es el órgano del aparato visual, que recoge la luz, la enfoca en su interior sobre la retina, membrana de tejido nervioso que le recubre por dentro, y al recibir el estímulo luminoso produce una serie de impulsos eléctricos que conducidos hasta los centros nerviosos encefálicos producen la sensación de “ver”. Se han hecho muchos intentos por simplificar el sistema óptico del ojo humano, particularmente usando las ecuaciones de lente gruesas [2]. El globo ocular tiene una longitud axial promedio de 22.5 mm, y el índice de refracción del ojo es de 1.33, el índice de refracción del humor acuoso es de aproximadamente 1.3337. El sistema óptico del ojo humano es conceptualizado más precisamente como un sistema de cuatro medios: córnea, el humor acuoso, el cristalino y el humor vítreo. Contra la creencia popular, la córnea es impor-

tante al conformar la curvatura anterior del humor acuoso, como se muestra en la Figura 1.1.

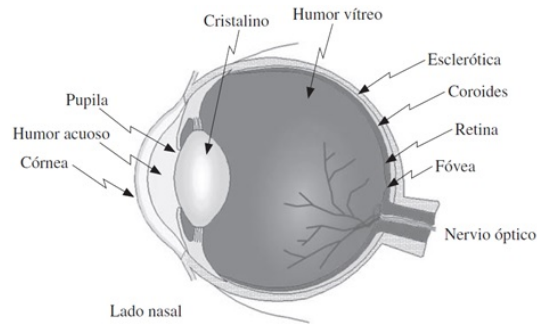


Figura 1.1: Esquema anatómico del ojo humano. (Imagen de [4])

- La cornea [1] es la parte transparente de la cubierta externa del globo ocular, en la cual ocupa el sitio más anterior y forma el primero de los medios transparentes. Tiene una forma más o menos circular con un diámetro de casi 12mm (11.7 horizontal 10.5 en el vertical) y su radio de curvatura es más corto que el de la esclera, por lo que parece estar sobrepuesto en esta a la manera de vidrio de reloj, siendo responsable del 70 % de la refracción total del ojo (43 dioptrías aproximadamente) por su especial curvatura y su índice de refracción tisular sumados a la refringencia del humor acuoso de la cámara anterior. El grosor aproximado de la córnea es de poco más de medio milímetro teniendo en el tercio central (esférico) de unos cuatro milímetros de diámetro, y 0.5 de grosor y llegando en la periferia casi a un milímetro y con curvaturas distintas.
- El cristalino es una formación lenticular transparente y biconvexa de naturaleza fibrosa, que está situada por detrás de la pupila y adelante del cuerpo vítreo. Suspendido en el eje óptico del ojo por un ligamento también fibroso y teniendo como principal función acomodar la refracción del ojo a diferentes distancias para permitir una visión, teniendo in situ

una refracción de 19 dioptrías que corresponde al 30% de la refracción ocular total, además, tiene un tamaño aproximado de 9 mm de circunferencia por 5 mm de grosor. Cabe mencionar que el cristalino va tornándose más denso y menos transparente (escleroso) al avanzar en edad el sujeto, siendo en el niño y en el joven de naturaleza blanda incluso en el núcleo, para llegar en el anciano a formar un todo resistente.

- El cuerpo vítreo es una estructura gelatinosa de forma esférica que ocupa el interior del globo ocular, estando situado por dentro del casquete esclero corneal y de las membranas internas. Por ello tiene un tamaño aproximadamente de 16.5 mm de diámetro y un volumen que corresponde al 80% del ojo. Esta voluminosa formación desempeña un doble papel primordial: el de medio de transparencia que conduce los rayos luminosos hacia la retina y el de amortiguar y redistribuir las fuerzas aplicada a los tejidos oculares que le circundan.

1.2. Errores de refracción.

Emetropía [2] es ausencia de error de refracción y ametropía es la presencia de error de refracción. El ojo cambia de potencia de refracción al enfocar sobre objetos cercanos por medio de un proceso llamado acomodación, estudios a través de reflexiones a partir de varias superficies ópticas en el ojo han mostrado que el acomodamiento resulta de cambios en el cristalino. La contracción del músculo ciliar da como resultado el engrosamiento y la curvatura decreciente del cristalino, probablemente debido a la relajación de la cápsula de este último. Los principales errores de refracción son los siguientes:

- Miopía. Cuando se enfoca la imagen de objetos distantes en frente de la retina en el ojo sin acomodación, el ojo es miópico, o de vista corta. Los lentes negativos se usan para corregir

la imagen en miopía. Estos lentes mueven la imagen hacia atrás de la retina.

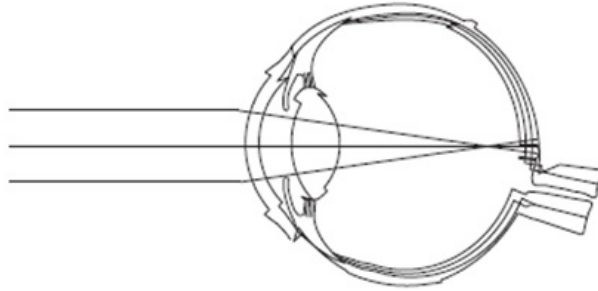


Figura 1.2: Ojo miope. (Imagen de [4])

- Hipermetropía. (hiperopía, dificultad para ver bien de cerca) es el estado en el cual un ojo no acomodado enfocarí la imagen detrás de la retina. Los lentes positivos se usan para corregir la imagen en hipermetropía

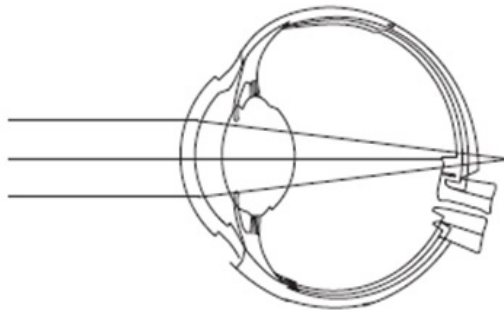


Figura 1.3: Ojo hipermetrope. (Imagen de [4])

- Astigmatismo. En astigmatismo el ojo produce una imagen con múltiples líneas o puntos focales. En astigmatismo regular hay dos meridianos principales, con potencias constantes y orientación a través de la abertura pupilar que da como resultado dos líneas focales. El astigmatismo regular a menudo puede ser corregido con lentes cilíndricas.

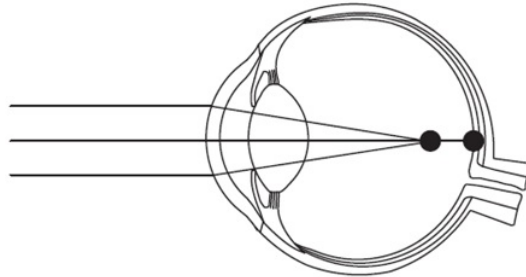


Figura 1.4: Ojo con astigmatismo. (Imagen de [4])

- Presbicia. La pérdida del acomodamiento que viene con el envejecimiento en toda la gente es llamada presbicia. Una persona con ojos emetrópicos (sin error de refracción) comenzará a notar incapacidad para leer letras pequeñas o discriminar objetos cercanos pequeños aproximadamente a la edad de 44 a 46 años. Estos síntomas se incrementan hasta aproximadamente la edad de 55 años, cuando se estabilizan, pero persisten. La presbicia es corregida con el uso de lentes de potencia progresiva (varifocales) de manera similar corrigen para distancias lejanas, medias y cercanas con cambio progresivo en la potencia del lente en vez de cambios graduales.

1.3. Corrección de los errores de refracción

Para cumplir su función específica de formar una imagen del mundo exterior [1], que transmitida a los centros visuales del cerebro despertará la sensación de “ver”, el globo ocular debe tener el funcionamiento de una cámara de televisión altamente precisa. Así, debe ajustar automáticamente su diafragma (apertura pupilar), su distancia del objeto (acomodación cristaliniana), su búsqueda y centrado del objeto (reflejo de fijación), etc., dando como resultado un enfoque perfecto e indudable de la imagen a nivel de la retina. Infortunadamente este complejo mecanismo sufre con frecuencia fallas, sea por causas congénitas o adquiridas tanto

a nivel de los medios transparentes (córnea, cristalino o humor vítreo) como de la retina o del mismo “poder de enfoque ocular” (refringencia). Esta última puede ser excesiva dicho familiarmente, dando una miopía con formación de la imagen por delante de la retina o insuficiente como en la hipermetropía que forma la imagen por detrás de la retina.

Limitándonos al estudio de estos “defectos de enfoque o refracción”, tendremos así que la imagen formada fuera de la retina, producirá a nivel de esta una impresión confusa en grado tanto mayor cuanto más importante sea el desenfoque y el arte médico acudirá en su ayuda, calculando el poder del lente corrector de ese desenfoque para lograr obtener esa nítida imagen en la retina, imprescindible para ver bien.

La fuerza o potencia de una lente, es decir, la capacidad que tiene para desviar los rayos paralelos hacia su foco principal, se expresa en función de esta “distancia focal”(la que separa el centro óptico de la lente y el foco principal), así se usa como unidad la “dioptría”. Una lente tiene una fuerza de una dioptría cuando su distancia focal está a un metro, es decir, una lente convexa, por ejemplo, tendrá un valor de una dioptría si a un metro del eje óptico de esta puede recogerse en una pantalla la convergencia de todos sus rayos. La potencia de una lente y su distancia focal están en razón inversa, $P = 1/f$ así, una lente de 4 dioptrías es 4 veces más potente que otra de una dioptría y tendrá su distancia focal 4 veces menor, o sea $1/4$ m (25 cm).

Abundando en la idea referente a los errores de refracción, Helmholtz (inventor del oftalmoscopio) dijo festivamente que: “Si un comerciante en instrumentos de óptica intentará venderme alguno con tantos defectos como el ojo, me consideraría con derecho a reprocharle su negligencia en los términos más severos”.

1.4. Lentes oftálmicas

La existencia del vidrio [3] se remonta a las antiguas civilizaciones. Durante el imperio Romano además de surgir las teorías emisionistas de la visión por parte de filósofos y eruditos como Pitágoras, Sócrates, Platón y Aristóteles, se descubren las propiedades del vidrio para variar el tamaño de las imágenes. Ya en Europa el monje franciscano Roger Bacon, en su *Opus Major* (1267), reconoce la utilidad de los segmentos de esfera de vidrio como “útil instrumento para las personas ancianas y aquellas que tienen los ojos débiles, pues ellas pueden ver así letras pequeñas con grandor suficiente”. Cuando se inventan las gafas a finales del siglo XIII, solo son utilizadas por los monjes en visión próxima.

Las gafas más antiguas que se conservan, halladas en 1953 en el monasterio de Weinhausen, son de madera de tilo, una de las lentes es biconvexa de +3.75 D y color amarillo, y la otra verde y de potencia +3.00 D. La diferencia de tonos de vidrio y de simetría en las potencias demuestra la dificultad en la fabricación del vidrio transparente, y que las lentes se aparejaban por aumentos parecidos una vez pulidas.

Ya entrando el siglo XX, Von Roh, a partir de los estudios de Tscherning, fabrica las primeras lentes menisco, conocidas como lentes puntuales, que son comercializadas por Zeiss. Durante todo el siglo pasado se han estado utilizando variaciones sobre estos primeros diseños, hasta que la aparición de generadores de superficie óptica por control numérico que permite, la utilización de superficies esféricas.

Es así que con el paso del tiempo surgen nuevas técnicas y nuevos modelos de lentes oftálmicas, las cuales intentan corregir los padecimientos producidos por los errores de refracción más frecuentes, tomando en cuenta, tendencias de moda, costo, materiales, pero principalmente una mejora significativa en la funcionalidad de dichas lentes, es por ello que a continuación se describen algunos

tipos de lentes oftálmicas más utilizadas.

- Lentes monofocales. Las lentes monofocales o esféricas están constituidas por dos superficies esféricas o por una superficie plana y otra esférica. De la combinación de estas dos superficies se obtienen los distintos tipos o formas de las lentes. Las superficies esféricas son las más sencillas de estudiar ya que presentan equivalencia en todos sus meridianos; por lo que, tanto sus propiedades geométricas como ópticas son constantes en toda la sección de la superficie. Para corregir la miopía (dificultad para ver bien de lejos), se usan las lentes esféricas cóncavas (negativas) (ver Figura 1.5 a)), mientras que para poder corregir la hipermetropía (dificultad para ver bien de cerca) es necesario el uso de lentes esféricas convexas (positivas) (ver Figura 1.5 b)). En ambos casos las lentes mueven la imagen hacia la retina.

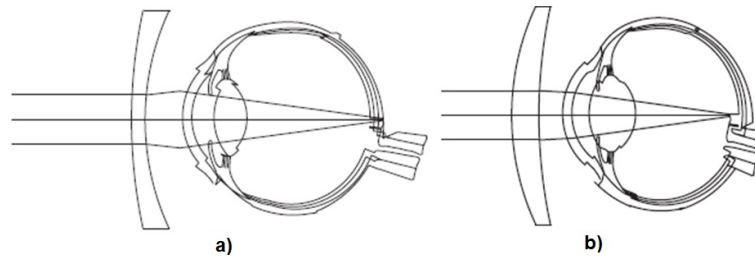


Figura 1.5: a) Ojo miope corregido, b) Ojo hipermetrope corregido. (Imagen de [4])

- Lentes cilíndricas. Al seccionar un cilindro [3] mediante un plano paralelo a su eje de revolución se obtiene una lente cilíndrica formada por dos superficies, una de las cuales es plana y otra cilíndrica. Estas lentes se utilizan para la compensación del astigmatismo cuando uno de los dos meridianos principales del ojo es emétrepe. Este tipo de lentes están compuestas por dos potencias distintas (P_1 y P_2) que corresponden a dos ejes perpendiculares entre sí, dichas potencias componen la

potencia esférica (S) y la potencia cilíndrica (C) que se puede obtener de dos métodos distintos, primer método: cuando $S = P_1$ y $C = P_2 - P_1$; segundo método: cuando $S = P_2$ y $C = P_1 - P_2$.

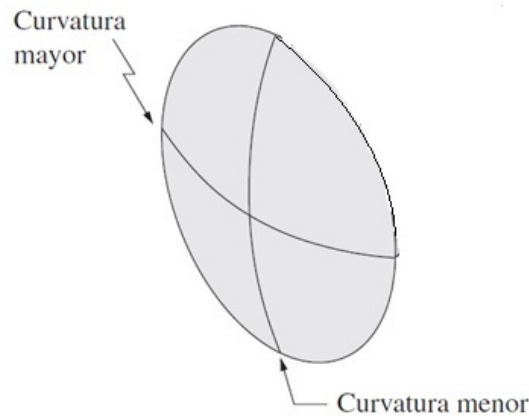


Figura 1.6: Lente cilíndrica

- Lentes Multifocales. El ojo Humano emétrope o amétrope corregido, en estado de reposo constituye un sistema óptico cuyo foco imagen se encuentra situado en la retina, donde enfoca los objetos que están en el infinito. Para enfocar objetos cercanos utiliza lo que se conoce con el nombre de acomodación, que consiste en un incremento de la potencia del cristalino. Con la edad la flexibilidad de esta lente va disminuyendo hasta el punto que llega a ser necesaria una compensación óptica adicional para corregir la nitidez en visión próxima. A esta condición se le llama presbicia. Los lentes multifocales suponen una solución a dicho problema puesto que reúnen en un solo dispositivo la compensación óptica necesaria para la visión lejana y cercana.
- Lentes bifocales. Las lentes bifocales fueron las primeras en aparecer y son una buena solución para los presbíteros recientes. Con el tiempo, sin embargo, su campo de acción resulta

insuficiente pues solo son útiles para distancias lejanas y para las tareas que se ejecutan a distancias de lectura (25 cm), dejando una zona intermedia por cubrir. (ver Figura 5.6)

- Lentes progresivas. Una lente progresiva [3] es una lente multifocal monobloque especialmente diseñada para compensar los efectos de la presbicia, y en la que la potencia varía sin discontinuidades desde una potencia adecuada para la visión de lejos hasta una potencia adecuada para la visión de cerca. La primera lente progresiva de que se tiene noticia es la patentada por Owen Aves en 1907, en Inglaterra. Zona de distancia, de potencia constante situada en la parte superior y correspondiente a la visión de lejos. Zona de lectura, de potencia constante, situada en la parte inferior y correspondiente a la visión de cerca. Corredor progresivo, que comunica la zona de distancia y la de lectura, y en el que la potencia varía de una manera continua entre las potencias correspondientes a las zonas anteriores. El corredor progresivo posee una cierta anchura con unas buenas características ópticas; ahora bien a ambos lados se encuentran dos zonas marginales que presentan aberraciones y en las cuales la visión es defectuosa, pero su existencia es el precio a pagar por la variación continua de potencia. (ver Figura 5.8)

Capítulo 2

CRITERIOS Y MÉTODOS ÓPTICOS IMPLEMENTADOS EN EL NUEVO LENSÓMETRO

A continuación se presentan los conceptos ópticos que dan descripción y entendimiento a un nuevo método de medición de lentes oftálmicas que nos conducen al nuevo sistema óptico propuesto.

2.1. Lensómetro convencional

En la práctica de la optometría [4] es esencial el uso de instrumentos para medir la distancia focal posterior o su inverso, que es la potencia de vértice, de la manera más rápida, precisa y simple. Hermann Snellen en 1876 fue de los primeros en desarrollar este instrumento usando un banco óptico, pero era un poco complicado de usar por personas sin un buen entrenamiento previo, Troppman en 1912 simplificó este instrumento un poco más. Los primeros instrumentos comerciales para este propósito fueron patentados alrededor de la década de los veinte en el siglo XX, por la compañía Bausch and Lomb, con el nombre de vertómetro, y un poco más tarde por American Optical, con el nombre de lensómetro. Posteriormente se usaron los nombres de focímetros o medidores de lentes. El lensómetro o vertómetro cuyo esquema se

muestra en la Figura 2.1, mide la distancia focal posterior f_p , o su inverso, llamado potencia de vértice P_v , de las lentes oftálmicas o anteojos de la manera que se describirá enseguida. En este instrumento una fuente ilumina una retícula, y una lente convergente de distancia focal f está colocada a una distancia x de la retícula. La lente oftálmica cuya potencia se desea medir está a su vez a una distancia d de la lente convergente.

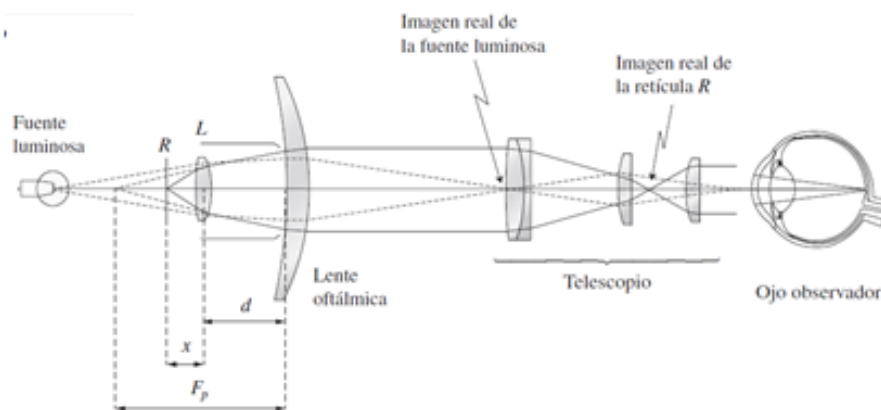


Figura 2.1: Esquema de un lensómetro. (Imagen de [4])

Dada una distancia fija d , se selecciona x de tal forma que los rayos salgan paralelos de la lente oftálmica, lo cual se comprueba mediante un telescopio permanente enfocado al infinito.

El lensómetro (ver Figura 2.1), está formado por una lente auxiliar de distancia focal f_1 y un telescopio. Al colocar la lente oftálmica a una distancia d de la lente convergente, la imagen de la retícula vista por el telescopio se observará desenfocada. Entonces se varía x hasta que la retícula se vea enfocada en el plano focal del telescopio.

En seguida demostraremos que si $d = f_1$ y la retícula se observa enfocada en el telescopio, entonces la potencia P_v , de la lente oftálmica es directamente proporcional a x .

La distancia f_p o su inverso P_v se puede calcular con facilidad conociendo x y las constantes f_1 y d , como se verá a continuación,

para esto se hace uso del esquema 2.2.

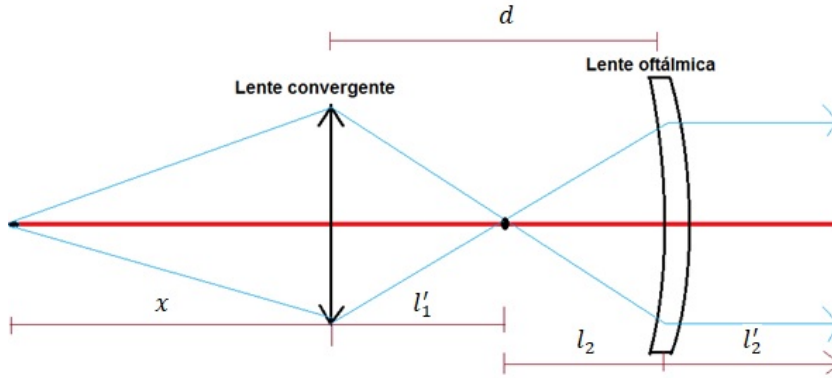


Figura 2.2: Arreglo lente convergente-lente oftálmica.

Con respecto a la Figura 2.2 observamos que

$$l'_1 + l_2 = d \quad (2.1)$$

Usando la fórmula de Gauss para la lente convergente

$$\frac{1}{l'_1} + \frac{1}{x} = \frac{1}{f_1} \quad (2.2)$$

Despejando l'_1 de (2.2) se obtiene

$$l'_1 = \frac{x f_1}{x - f_1} \quad (2.3)$$

Por otro lado observamos que

$$l_2 = d - l'_1. \quad (2.4)$$

Ahora se usa la fórmula de Gauss para lente oftálmica

$$\frac{1}{l'_2} + \frac{1}{l_2} = \frac{1}{f_2} \quad (2.5)$$

Ya que debe salir un haz de rayos paralelos $l'_2 \rightarrow \infty$, por tanto

$$f_2 = l_2 \quad (2.6)$$

Sustituyendo l_2 de (2.4) en (2.6) se obtiene

$$f_2 = d - l'_1 \quad (2.7)$$

Sustituyendo l'_1 de (2.3) en (2.7) tenemos

$$f_2 = d - \frac{x f_1}{x - f_1} \quad (2.8)$$

Con el fin de que P_v resulte lineal con x se escoge:

$$f_1 = d \quad (2.9)$$

Y por lo tanto sustituyendo (2.9) en (2.8) se obtiene

$$P_v = \frac{1}{d} - \frac{x}{d^2} \quad (2.10)$$

Como puede observarse P_v es directamente proporcional a x .



Figura 2.3: Lensómetro comercial (Imagen de [4])

2.2. Método de autocolimación

El método de autocolimación es usado para ciertos fines, entre los cuales están la obtención de puntos nodales, la medición de

distancias focales, entre otros; debido a la importancia de este método a continuación se describirá de una manera breve.

El método de autocolimación [5] consiste en usar la distancia focal de una lente para posicionar esta, tal que, se colocará una abertura en el punto focal primario. El haz que sale de la lente debería ser casi paralelo, lo siguiente es montar el espejo plano para interceptar el haz paralelo que emerge de la lente, y, reflejar el haz de vuelta hacia la misma lente para formar una imagen un poco al lado de la abertura. Se pueden hacer algunos ajustes necesarios en la posición de la lente para producir la imagen lo más nítida posible. Este método de la medición de la distancia focal es un procedimiento importante y útil.

2.3. Prueba de Ronchi

La prueba de Ronchi [6] es uno de los más simples y poderosos métodos para evaluar y medir las aberraciones de un sistema óptico. El físico italiano Vasco Ronchi descubrió que cuando una rejilla estuviera colocada cerca del centro de curvatura de un espejo, la imagen de la rejilla aparecería superpuesta sobre sí misma, produciendo un tipo de patrón de Moiré que él llamo franjas combinadas. Ya que las sombras de esas combinaciones de franjas dependen de las aberraciones del espejo, él inmediatamente consideró aplicar el fenómeno para la prueba de calidad de espejos. Sin embargo, la combinación de franjas le resultó extremadamente difícil de interpretar. Una de las primeras aplicaciones de este método fue la medición de aberraciones del telescopio hecho por Galileo y una lente hecha por Torricelli. La primera aplicación seria de esta prueba para telescopios astronómicos fue realizada por Anderson y Porter, y desde entonces esta ha sido extensamente usada por astrónomos profesionales y amateurs. Así como la prueba del alambre es considerada conceptualmente, como una extensión de la prueba de la navaja [7], la prueba de Ronchi (1923)

puede ser considerada, ver Figura 2.4, como una extensión de la prueba del alambre, si consideramos una rejilla de Ronchi formada de diferentes alambres equidistantes y paralelos. En la rejilla de Ronchi las hendiduras son alternadas entre claras y oscuras con el mismo grosor, y se asume que son paralelas al eje x . La extensión de la prueba de Ronchi nos da información global de la superficie, en esta prueba la información es obtenida a la misma vez que con diferentes alambres, además, las franjas del ronchigrama “cubren” la pupila de salida del sistema bajo prueba.

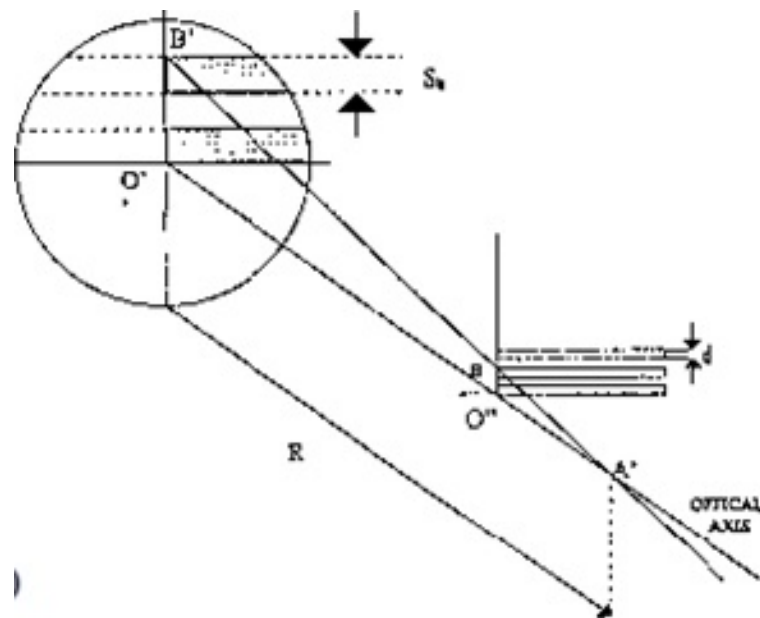


Figura 2.4: Ronchigrama de un frente de onda esférico, A' es el centro de curvatura paraxial; O'' es el plano de la rejilla localizado a lo largo del eje óptico; O' es el plano de la pupila de salida o la superficie bajo el plano de prueba. (Imagen de [6])

De la prueba del alambre es claro que si estamos probando un frente de onda esférico con una rejilla de Ronchi, un ronchigrama de franjas paralelas e igualmente espaciadas será observado (ver Figura 2.4). La separación S_b , entre dos bordes de dos franjas consecutivas en el ronchigrama es igual a:

$$S_b = \frac{R}{D_f}d, \quad (2.11)$$

Donde R es el radio de curvatura del frente de onda, D_f es la separación A' y O'' entre el punto imagen ideal A' , y el punto de intersección O'' del plano de la rejilla con el eje óptico, y d es la distancia entre dos bordes consecutivos en la rejilla de Ronchi, el cual es la mitad del periodo de la rejilla.

Para un espejo esférico un resultado bien conocido de esta prueba viene de la ecuación (2.11), el cual es la dependencia del grosor de las franjas, S_b , con el grosor d , de las hendiduras de la rejilla. En este caso, si una rejilla de frecuencia más grande es usada (una menor a d), la frecuencia de las franjas también se incrementará, esto significa que S_b disminuirá.

2.4. Criterio de mínimo número de manchas

El término de “mínimo número de manchas” es un criterio bastante utilizado en el nuevo lensómetro, el cual se usa específicamente para encontrar la potencia refractiva de la lente probada, o, para encontrar la potencia de las distintas zonas que componen una sola lente oftálmica.

Al ir desplazando la rejilla, variando x , llega a un punto (o varios puntos) donde se pueden observar el bironchigrama con un mínimo número de manchas (ver Figura 2.5), esto nos indica que hemos encontrado el punto focal del sistema lente auxiliar-lente oftálmica, puesto que el cono de luz que regresa a la rejilla converge y entra solo por una parte transparente (u opaca) de esta, este hecho nos muestra la distancia adecuada que se sustituye en la ecuación (2.10) para obtener la potencia deseada.



Figura 2.5: Criterio de mínimo número de manchas. La rejilla se va desplazando hasta observar una imagen con un mínimo número de manchas, como se muestra en la figura.

2.5. Pruebas ópticas en ciencias de la visión.

La optometría (entre diversos temas de salud visual), es la disciplina encargada de la corrección de defectos refractivos del ojo haciendo uso de lentes oftálmicas. El control y medición de dichas lentes se realiza a través de instrumentos como el lensómetro. La implementación de pruebas ópticas en ciencias de la visión es un tema no del todo nuevo, probablemente se deba a que entre estas dos ciencias se encuentra como puente de conexión el estudio de la óptica; entre alguno de los métodos usados se encuentra la prueba de Ronchi, otro método también implementado es la prueba de Hartmann, importante en su tipo ya que se aplica en diversas áreas de la lensometría, topografía corneal y aberrometría, ramas importantes dentro de la salud visual, por ello radica la importancia de crear nuevos y mejores diseños de medición y caracterización óptica, los cuales sirvan como apoyo a ciencias encargadas del diagnóstico y corrección de padecimientos visuales

como son: la oftalmología y la optometría

La prueba de Hartmann se ha utilizado para medir la potencia de las lentes oftálmicas, la topografía corneal y las aberraciones oculares [8]. En dicho trabajo, al examinar los diferentes frentes de onda, se destaca que en los tres casos se obtienen relaciones matemáticas similares, por lo que el frente de onda se puede determinar en cada caso empleando el mismo método de integración. Posteriormente se calculan las cantidades de interés a saber: en lensometría, los mapas de potencia refractiva cilíndrica y esférica; en topografía, el mapa de curvatura tangencial; y en aberrometría, el mapa de aberración de frente de onda. Se destaca la implementación de la prueba de Hartmann por parte de algunas compañías comerciales.

Una implementación de la bien conocida prueba de Ronchi, la cual permite mediciones perfilométricas de superficies simétricas no rotacionales, es aplicada para la medición de superficies toroidales [10]. Se hace uso de un arreglo experimental y un procesamiento de datos; parámetros como el radio de curvatura de una superficie de muestra, la orientación de sus meridianos principales, y la posición de su vértice son medidos para medio de los valores de una normal local, que permiten la reconstrucción del perfil en tres dimensiones de la superficie toroidal considerada con exactitud micrométrica. Es conocido que la prueba de Ronchi se ha utilizado para evaluar superficies oftálmicas toroidales [9, 10], no rotacionalmente simétricas [11] y de forma libre [12], así como la potencia [13] y del control de calidad [14] de las lentes oftálmicas.

Aplicando unas simples mejoras, una técnica importante de la prueba de Ronchi puede ser utilizada para obtener aproximaciones de mapas de distribución de potencias de lentes progresivas comerciales [13]. En esta técnica, un detector CCD es usado para obtener un mapa de inclinación con alta resolución, el cual se combina con múltiples técnicas de adquisición, esto permite mediciones de alta resolución del desplazamiento lateral 10^{-4} m y me-

diciones de inclinación 10^{-5} rad con el rango dinámico requerido en mediciones de inclinación para potencias de lentes progresivas. Estas técnicas se han aplicado con una sola rejilla de Ronchi y una mayor resolución espacial [10, 11, 13, 14], y con una cuadrícula de Ronchi [9, 12, 15].

T. Yonte [16] probaron lentes oftálmicas mediante deflectometría de Moiré usando un arreglo de autocolimación [17] con dos resoluciones de Ronchi. La deflectometría de Moiré ha sido utilizada con éxito para la determinación del índice de refracción, análisis del gradiente de temperatura, topografía y control del paralelismo de superficies entre otras [16], hoy en día se aplica este método para la prueba de lentes oftálmicas. Sin embargo la deflectometría de Moiré aplicada a la industria oftálmica necesita una automatización de las pruebas, lo cual presenta unas ventajas en el proceso de control de calidad que hace que la industria trabaje con esto.

Para evitar la rotación dominante de Ronchi, se aplica una cuadrícula de Ronchi [15] para medir la potencia de la lente oftálmica de forma libre [18]. Con el desarrollo de las lentes oftálmicas de forma libre, especialmente por la aparición de lentes de adición progresiva, el lensómetro óptico tradicional no puede satisfacer los requerimientos para la medición de potencias ópticas [18]. Las lentes oftálmicas de forma libre involucran una alta resolución en los procesos de manufacturación tecnológica, debido a la forma particular esférica no asimétrica de su superficie convexa. Aplicando unas simples mejoras, una prueba de Ronchi de dos dimensiones puede ser usada para obtener mapas de distribución de aproximación de potencias de lentes oftálmicas de forma libre.

En la siguiente sección se describe la disposición experimental de un lensómetro de autocolimación con una rejilla cuadrículada de Ronchi. Y posteriormente se muestra un conjunto de resultados para la potencia de las lentes oftálmicas para lentes monofocales, astigmáticas, bifocales y progresivas.

Capítulo 3

NUEVO ARREGLO EXPERIMENTAL

En la siguiente sección se describe la disposición experimental de un lensómetro de autocolimación con una rejilla cuadrículada de Ronchi. Y posteriormente se muestra un conjunto de resultados para la potencia de las lentes oftálmicas para lentes monofocales, astigmáticas, bifocales y progresivas.

3.1. Montaje experimental

El lensómetro comercial se modificó de tres maneras, ver Figura 4.1. Por un lado, se hizo un autocolimador [5] con lentes L_a (lente auxiliar), L_o (lente oftálmica) y un espejo plano, y luego se retiró el telescopio. Esto es similar al método descrito por Yonte [16]. Por el otro lado, la retícula del colimador se reemplaza por una cuadrícula de Ronchi. Además, interpretamos el ronchigrama como un patrón de franjas de Moiré, en cuyo caso se puede utilizar una fuente extendida (LED) y no es necesaria una placa semirreflectante. Con estos cambios, el sistema es compacto y preciso. Para evaluar la potencia de la lente, el plano focal anterior se localiza moviendo la cuadrícula de Ronchi hasta que no se observen manchas (criterio de mínimo número de manchas) en el

plano del bironchigrama. La distancia x se sustituye entonces en la ecuación. (2.10) y se calcula la potencia P de la lente oftálmica. En la siguiente sección, se muestran los resultados experimentales de las lentes monofocales, astigmáticas, bifocales y progresivas.

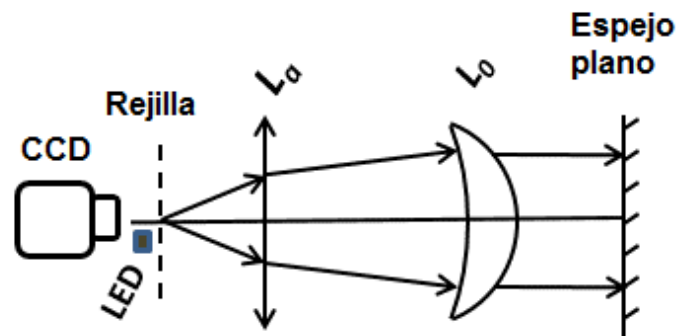


Figura 3.1: Diagrama del lensómetro con autocolimación y rejilla cuadrada de Ronchi.

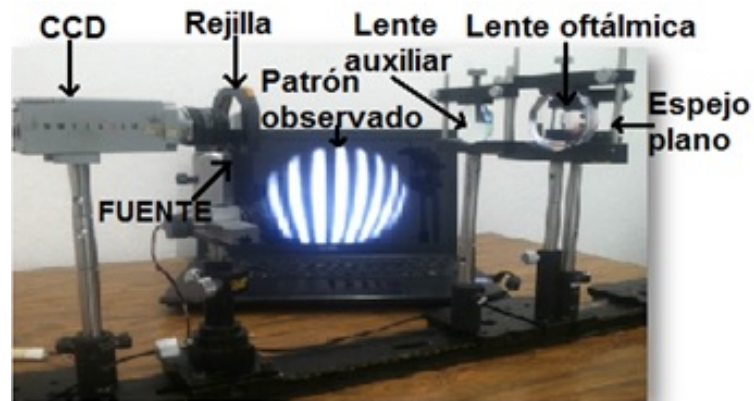


Figura 3.2: Fotografía del montaje experimental

Capítulo 4

RESULTADOS EXPERIMENTALES

En esta sección, se reportan las mediciones de potencia para lentes monofocales, astigmáticas, bifocales y progresivas.

4.1. Lentes monofocales

La miopía y la hipermetropía se corrigen usando lentes monofocales que están hechas con dos superficies esféricas [2, 3]. Cuando se coloca una lente monofocal en nuestro lensómetro, se observa un bironchigrama (patrón observado con una rejilla cuadrículada de Ronchi), vea las Figs. (5.1) y (5.2). Si la rejilla de Ronchi se mueve a lo largo del eje óptico, se pueden observar varios bironchigramas. Las Figs. 5.1 (a), 5.1 (b) y 5.1 (c) muestran bironchigramas antes, en y después del plano focal para una lente positiva, respectivamente. Además, en las Figs. 5.2 (a), 5.2 (b) y 5.2 (c), se muestran los respectivos bironchigramas para una lente negativa. Los valores x para puntos con un mínimo número de manchas (Figs. 5.1 (b) y 5.2 (b)) se miden y los valores de potencia respectivos se calculan con la ecuación (2.10).

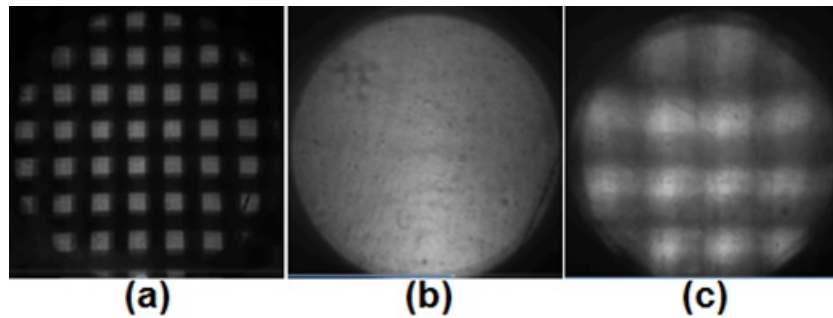


Figura 4.1: Bironchigramas de una lente oftálmica positiva.

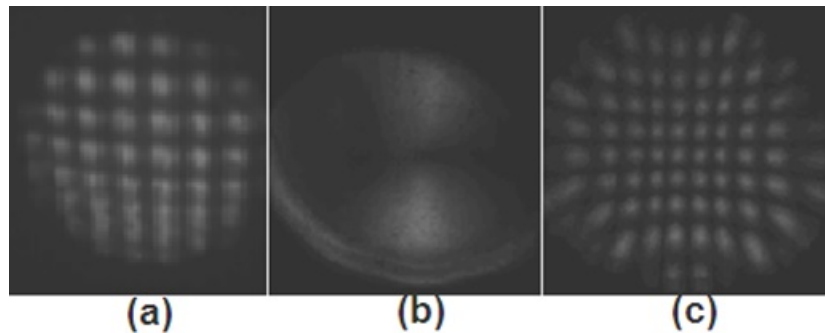


Figura 4.2: Bironchigramas de una lente oftálmica negativa.

4.2. Lentes cilíndricas.

El astigmatismo del ojo se corrige mediante el uso de superficies toroidales en las lentes oftálmicas [19]. Si bien estas lentes tienen diferentes potencias de un meridiano a otro, solo se necesita conocer la potencia de P_x y P_y , que están asociados en dos ejes perpendiculares principales.

Cuando probamos una lente toroidal en nuestro lensómetro y la rejilla cuadrículada de Ronchi se mueve a lo largo del eje óptico, podemos encontrar dos posiciones, x_x y x_y , donde las manchas cambian a franjas para la superficie sagital, ver Fig.5.3 (b), y la superficie tangencial, ver Fig.5.3 (c), respectivamente. Al sustituir, x_x y x_y , en la ecuación (2.10), se pueden calcular P_x y P_y . Antes y después de los planos sagital y tangencial, vea la Fig. 5.3 (a)

y la Fig. 5.3 (d), hay puntos en bironchigramas con diferentes frecuencias en ambas direcciones.

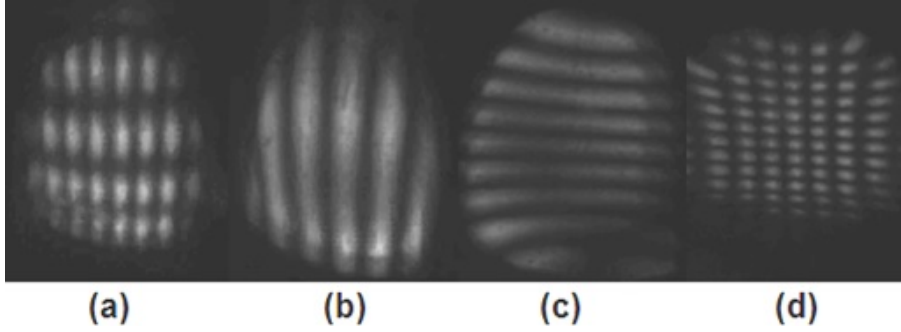


Figura 4.3: Bironchigramas de una lente cilíndrica.

Como es una lente cilíndrica tenemos dos potencias:

P_x (Dirección en x) y

P_y (Dirección en y).

La lente cilíndrica cuenta con tres superficies:

Superficie 1 (Esférica), con curvatura $C_{1x} = C_{1y} = C_1$.

Superficie 2 (Plana), con curvatura $C_{2x} = C_{2y} = 0$

Superficie 3 (Cilíndrica), con curvatura $C_{3x} \neq 0, C_{3y} = 0$

Por definición de potencia:

$$P_{x(Sistema)} = (n - 1)(C_{1x} - C_{3x}) \quad (4.1)$$

$$P_{y(Sistema)} = (n - 1)(C_{1y} - C_{3y}) \quad (4.2)$$

Distribuyendo en (5.1) y tomando en cuenta que $(n - 1)C_{3x} = P_c$ ya que C_{3x} pertenece a la superficie cilíndrica y por definición de potencia tenemos

$$P_c = P_y - P_x \quad (4.3)$$

Por lo tanto las potencias esféricas y cilíndricas se pueden calcular a partir de las potencias P_x y P_y .

$$P_s = P_x \quad (4.4)$$

$$P_c = P_y - P_x, \quad (4.5)$$

O alternativamente

$$P_s = P_y \quad (4.6)$$

$$P_c = P_x - P_y, \quad (4.7)$$

Lo cual es equivalente a la forma en que se obtiene las potencias, respecto a la sección 1.4 en la parte de lentes cilíndricas.

En la Figura 5.4, la potencia esférica medida con nuestro lensómetro se muestra en comparación respecto a la medida con un lensómetro comercial. La Figura 5.5 muestra las dos medidas para la potencia cilíndrica.

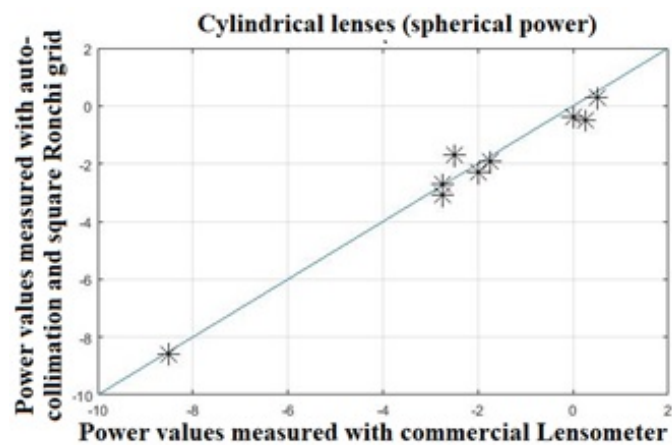


Figura 4.4: Tabla comparativa, lente cilíndrica (potencia esférica).

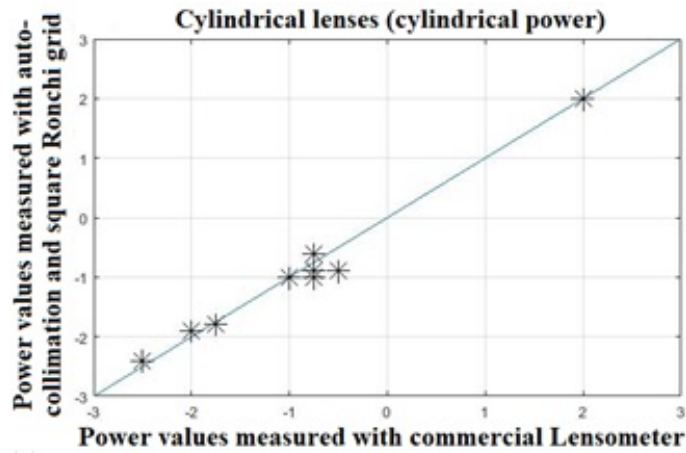


Figura 4.5: Tabla comparativa, lente cilíndrica (potencia cilíndrica).

4.3. Lentes bifocales

Cuando el ojo se ve afectado por la presbicia, es necesario usar una lente positiva para leer objetos cercanos y una lente negativa para objetos distantes. Esto significa que es necesaria una lente bifocal, ver Figura 5.6.

Cuando se coloca una lente bifocal en nuestro lensómetro y la rejilla cuadrículada de Ronchi se mueve a lo largo del eje óptico, se observan dos bironchigramas con diferentes frecuencias en ambas zonas, ver Fig. 5.7 (a). Conforme avanza el desplazamiento, las franjas en la zona superior se eliminan, ver Fig. 5.7 (b). Luego, en la zona cercana de la lente, las franjas se desvanecen, vea la Fig. 5.7 (c), y finalmente ambas zonas aparecen con franjas, como se puede ver en la Fig. 5.7 (d). A partir de los datos x , se calcularon ambas potencias.



Figura 4.6: Diagrama de una lente bifocal

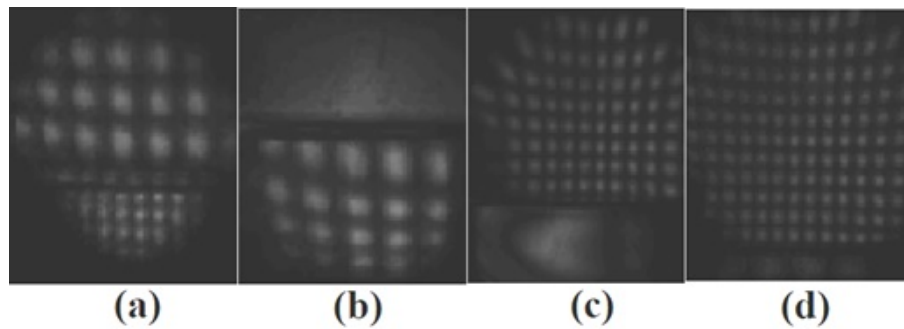
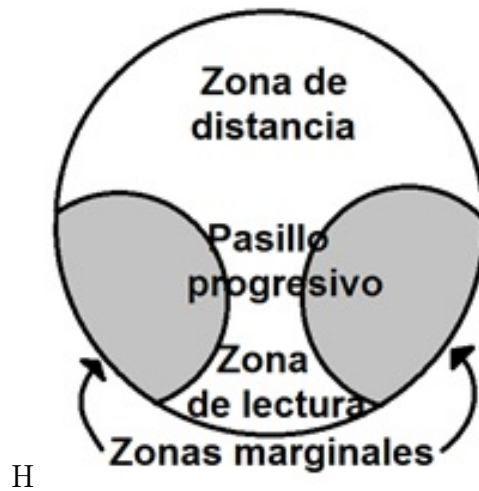


Figura 4.7: Bironchograma de una lente bifocal.

4.4. Lentes progresivas

Se usa una lente progresiva para corregir la presbicia. Este tipo de lentes tiene un conjunto continuo de valores de potencia a lo largo de las áreas de visión cercana, del corredor y de distancia, vea la Figura 5.8. En esta sección se informan las mediciones de potencia de lentes progresivas.

Una vez que la lente progresiva se coloca en nuestro lensómetro y la rejilla cuadrículada se desplaza longitudinalmente, se obtuvieron los siguientes resultados. En primer lugar, se observa una densidad de punto variable en el bironchograma, ver Figura 5.9 (a).



H
Figura 4.8: Diagrama de una lente progresiva.

Los puntos luego desaparecen cuando la rejilla se encuentra en la zona de distancia (Figura 5.9 (b)), posteriormente en el corredor de progresión (Figura 5.9 (c)) y después en la zona de lectura (Figura 5.9 (d)). Para cada posición se calcularon potencias de -0.7 D, -0.2 D y $+1.6$ D, respectivamente, dichos valores obtenidos corresponden claramente a una progresión en la potencia de la lente medida. Finalmente, para la otra posición de la cuadrícula de Ronchi, se ven nuevamente puntos con densidad variable (Figura 5.9 (e)).

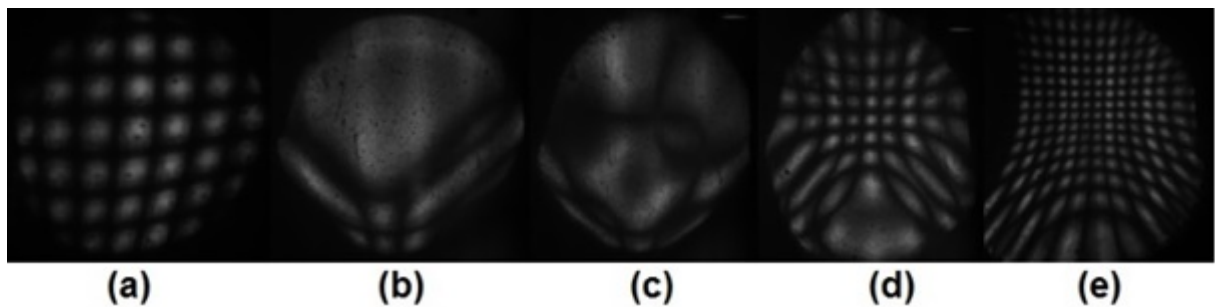


Figura 4.9: Bironchigrama de una lente progresiva

Capítulo 5

ANÁLISIS DE ERRORES

Para evaluar los errores generados en ambos lentes, construimos un lensómetro comercial con un telescopio, también se hizo uso de una lente auxiliar L_A de distancia focal igual a 10 cm. (ver Figura 6.1), dicho lensómetro, se puede transformar en un lensómetro de autocolimación mediante la introducción de un espejo plano, (ver Figura 6.2)

Las potencias P_A y P_T de seis lentes monofocales se midieron diez veces con cada uno de los lentes. En la Figura 6.3 se muestra la gráfica de P_A vs. P_T usando los lentes de L_A y L_T respectivamente. Como referencia, se traza una línea recta ($P_A = P_T$) y, como puede ver, ambas mediciones están cerca de esta línea recta.

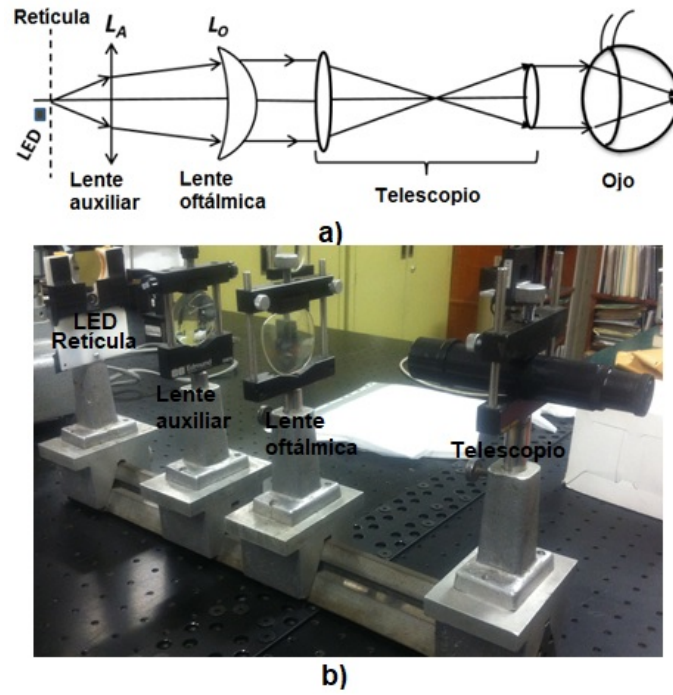


Figura 5.1: Configuración del lensómetro comercial: a)Esquema, b)Fotografía.

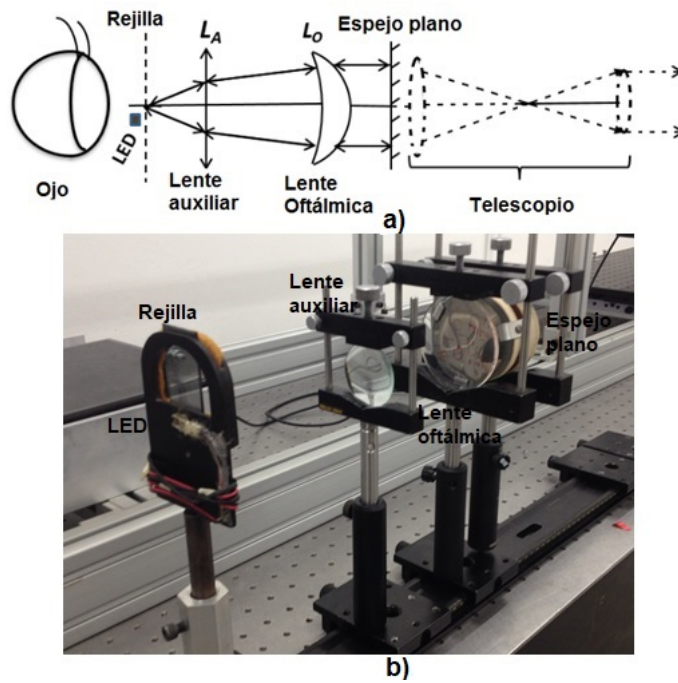


Figura 5.2: Configuración del lensómetro autocollimado: a) Esquema, b) Fotografía.

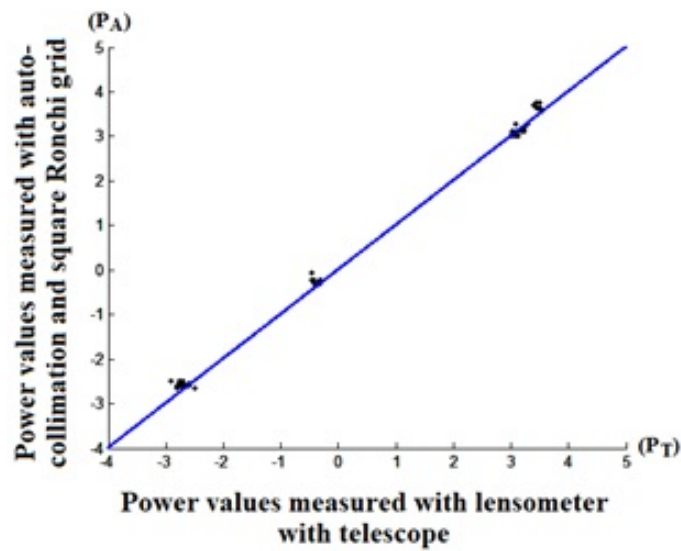


Figura 5.3: Tabla comparativa de potencias.

Para completar el análisis de error, se calcularon las desviacio-

nes estándar, σ_A y σ_T , para los lentes de L_A y L_T . Encontramos que σ_A y σ_T están en los intervalos $0.041D \leq \sigma_A \leq 0.082D$ y $0.036D \leq \sigma_T \leq 0.089D$ respectivamente, esto significa que ambos instrumentos son similares en desviación estándar.

Capítulo 6

CONCLUSIONES

El arreglo experimental implementado permite obtener ventajas con respecto al montaje de un lensómetro tradicional, entre ellas destaca que se cuenta con un sistema más compacto debido a la disminución del espacio usado, dicha ventaja se debe al uso del sistema de autocolimación, además con el uso de la prueba de Ronchi con rejilla cuadrículada se cuenta con una precisión considerable en las mediciones, lo que se refleja en los datos obtenidos que se acercan considerablemente a los calculados por un lensómetro comercial, cabe mencionar que una ventaja importante es que al medir las lentes progresivas, no se tiene que aislar las zonas de diferente potencia, por lo tanto, no es necesario marcarlas, ya que con el nuevo lensómetro se está caracterizando en todo momento cada parte de la lente bajo prueba, sin la necesidad de ajustar o mover la lente para su medición de las distintas zonas que componen una lente progresiva, ya que en el nuevo arreglo lo único que se mueve es la rejilla de Ronchi, y, esto es suficiente para medir las potencias requeridas. Dicha caracterización es bastante completa, no solo para el caso de las lentes progresivas, sino también para el resto de las lentes oftálmicas, ejemplificando claramente cada parte y característica principal de cualquier lente a probar, razón por la cual resulta sumamente productivo el uso del lensómetro autocolimado, ya sea para medir potencias o para explicaciones

pedagógicas en optometría, oftalmología entre otros temas.

Después de que se construyó el lesómetro de autocolimación, se midieron las potencias de las lentes oftálmicas esféricas, toroidales, bifocales y progresivas. Para las lentes esféricas, las desviaciones estándar se estimaron a partir de varias mediciones para cada lente. Se descubrió que las potencias y las desviaciones estándar son muy similares a las realizadas con un lesómetro comercial. Sin embargo, el lesómetro de autocolimación mencionado en este estudio es más barato y más compacto.

Apéndice A

PUBLICACIÓN Y PATENTE DEL LENSÓMETRO DE AUTOCOLIMACIÓN.

En el proceso del diseño, análisis y construcción del nuevo Lensómetro de Autocolimación, se recabaron diversos esquemas, valores experimentales, diseños, resultados, entre otros datos, lo suficientemente significativos para poder redactar un artículo científico. Dicho artículo fue enviado a la revista científica de especialidad en óptica: Applied Optics (The Optical Society). El nombre del artículo es : "Lensometer with autocollimation and a square Ronchi grid", el cual, fue recibido el 12 de septiembre de 2019, revisado el 2 de diciembre de 2019, aceptado el 7 de enero de 2020 y publicado el 17 de febrero de 2020 (Vol.59, No.6/20 February 2020/Applied Optics).

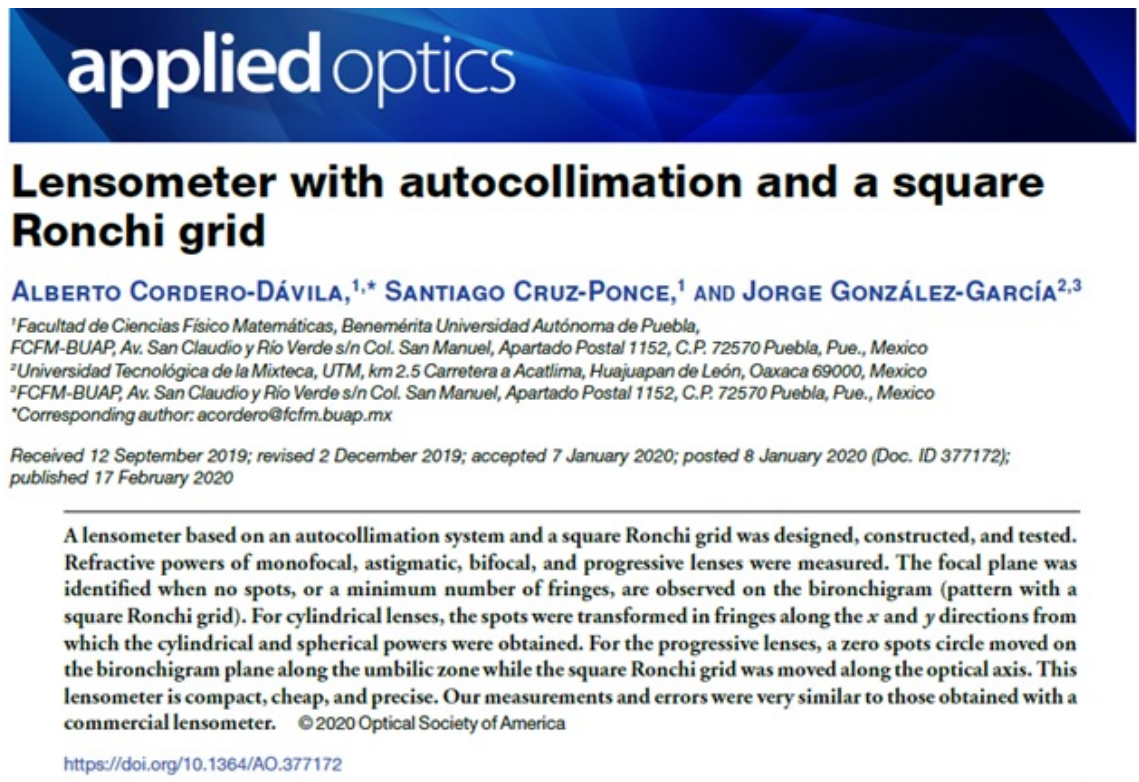


Figura A.1: Artículo publicado

Por otro lado, se presentó la solicitud de registro de patente ante el Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial (IMPI), posteriormente, se recibió la publicación de la solicitud de registro de patente de invención, y actualmente se encuentra en el proceso de examen de fondo, en espera de la obtención del título de patente, con folio: MX/E/2019/021626.

gob.mx															
Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial															
<p>Hoja adicional complementaria "Datos generales del o de los solicitantes" / "Datos generales del o de los inventores o diseñadores" (Use esta hoja en caso de que la solicitud sea presentada por dos o más personas físicas o morales)</p>															
Datos generales del solicitante o inventor o diseñador															
Datos generales del solicitante	<input checked="" type="checkbox"/> Datos generales del inventor o diseñador														
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Personas físicas</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>CURP (opcional):</td> </tr> <tr> <td>Nombre(s): Santiago</td> </tr> <tr> <td>Primer apellido: Cruz</td> </tr> <tr> <td>Segundo apellido: Ponce</td> </tr> <tr> <td>Nacionalidad: Mexicana</td> </tr> <tr> <td>Teléfono (lada, número, extensión): 01 222 2295500</td> </tr> <tr> <td>Correo electrónico (opcional): sanska888@hotmail.com</td> </tr> </tbody> </table>	Personas físicas	CURP (opcional):	Nombre(s): Santiago	Primer apellido: Cruz	Segundo apellido: Ponce	Nacionalidad: Mexicana	Teléfono (lada, número, extensión): 01 222 2295500	Correo electrónico (opcional): sanska888@hotmail.com	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Personas morales</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>RFC (opcional):</td> </tr> <tr> <td>Denominación o razón social:</td> </tr> <tr> <td>Nacionalidad:</td> </tr> <tr> <td>Teléfono (lada, número, extensión):</td> </tr> <tr> <td>Correo electrónico (opcional):</td> </tr> </tbody> </table>	Personas morales	RFC (opcional):	Denominación o razón social:	Nacionalidad:	Teléfono (lada, número, extensión):	Correo electrónico (opcional):
Personas físicas															
CURP (opcional):															
Nombre(s): Santiago															
Primer apellido: Cruz															
Segundo apellido: Ponce															
Nacionalidad: Mexicana															
Teléfono (lada, número, extensión): 01 222 2295500															
Correo electrónico (opcional): sanska888@hotmail.com															
Personas morales															
RFC (opcional):															
Denominación o razón social:															
Nacionalidad:															
Teléfono (lada, número, extensión):															
Correo electrónico (opcional):															

Figura A.2: Solicitud de patente de invención.

Bibliografía

- [1] PADILLA DE ALVA, FRANCISCO JAVIER, “Oftalmología fundamental”, 7 ed. (*Méndez Editores, 2011*), pp. 205-229.
- [2] R. RIORDAN-EVA, E. CUNNINGHAM JR., “Oftalmología General”, 18 ed. (*Mc. Graw Hill, 2012*), pp. 424-426.
- [3] J. SALVADOR ARQUÉS Y M. FRANSOY BEL, “Tecnología Óptica de Lentes Oftálmicas, diseño y adaptación”, (*alfaomega, 2000*).
- [4] DANIEL MALACARA, “Óptica Básica”, *Fondo de Cultura Económica, 2 ed. (2004)*, pp. 172-173.
- [5] C. HARVEY PALMER, *Optics Experiments and Demonstrations, 4 ed. (The Johns Hopkins Press, 1969)*, pp. 3, 68-69.
- [6] A. CORNEJO RODRÍGUEZ, “Ronchi Test”, en D. Malacara *Optical Shop Testing Third Edition, John Wiley and Sons, New York, 2007*.
- [7] A. CORNEJO RODRÍGUEZ Y A. CORDERO DÁVILA, “Ronchi Test” en D. Malacara, B. J. Thomson, *Handbook of Optical Engineering First Edition, Marcel Dekker, Inc, New York, 2001*.
- [8] YOBANI MEJÍA BARBOSA, “La prueba de Hartmann en ciencias de la visión”, *Cien. Tec. Salud. Visión. Ocul. 10, 149-165 (2012)*.

- [9] L. TÉLLEZ-ARRIAGA AND A. CORDERO, “Simulación de Ronchigramas para lentes con superficies toroidales”, *Rev. Mex. Fís.* 44, 540-574 (1998).
- [10] SANTIAGO ROYO, JOSEP ARASA AND CARLES PIZARRO. “Profilometry of toroidal surfaces with an improved Ronchi test,” *Appl. Opt.* 39, 5721-5731 (2000).
- [11] SANTIAGO ROYO, JOSEP ARASA AND JESÚS CAUM. “Sub-micrometric profilometry of non-rotationally symmetrical surfaces using the Ronchi test”. *Proc. SPIE 4101 153-164 (2000)*.
- [12] ALBERTO CORDERO-DÁVILA, JUANA ROSAURA KANTÚN-MONTIEL AND JORGE GONZÁLEZ-GARCÍA “Ronchigram simulations for free-form concave reflective surfaces”, *Optik – Int. J. light Electron Opt.* 124 4892-4895 (2013).
- [13] J. ARASA, J. CAUM, S. ROYO AND A. CIFUENTES. “Progressive addition lenses power map measurement using Ronchi test techniques”, *Proc. SPIE 5144 766-773 (2003)*.
- [14] SANTIAGO ROYO, JOSEP ARASA AND CARLES PIZARRO, “Application of a Ronchi technique to quality control of ophthalmic surfacing”, *Proc. SPIE 4101 488-496 (2000)*.
- [15] A. CORDERO-DÁVILA, E. LUNA-AGUILAR, S. VÁZQUEZ-MONTIEL, S. ZÁRETE-VÁZQUEZ AND M. PERCINO-ZACARÍAS, “Ronchi test with a square grid”, *Appl. Opt.* 37 672-675 (1998).
- [16] T. YONTE, J. QUIROGA, J. ALDA, E. BERNABEU, “Ophthalmic lenses testing by moiré deflectometry”, *Proc. SPIE 1554B 233-241 (1991)*.
- [17] WARREN J. SMITH, “Modern Optical Engineering”, *McGraw-Hill, Second Edition (1990), pp. 497-498*.

- [18] YUANYUAN WANG, JIANQI CAI, XIAOZHOU YU, FAN LU.,
“Freeform ophthalmic lenses Power Map Measurement based on two-dimensional Ronchi Test Techniques.” *Proc. SPIE* 8417, 84173A (2012).
- [19] WARREN J. SMITH, “Modern Optical Engineering”, ,” *second ed.*, (McGraw-Hill, 1990), pp. 129-130.