



Implementación de un banco óptico para el control del frente onda de lentes de contacto comerciales

Trabajo fin de grado
Autora: Ester Rubio Pérez

Directores:

**Jorge Ares García
M^a Victoria Collados Collados**

**Facultad de ciencias
2014-2015**

ÍNDICE

1 INTRODUCCIÓN

2 OBJETIVOS

3 METODOLOGÍA

3.1 PUESTA EN ORDEN Y CLASIFICACIÓN DEL MATERIAL DISPONIBLE

3.2 DISEÑO DEL SISTEMA

3.2.1 Diseño propuesto

3.2.2 Determinación de las dimensiones del sistema

3.2.3 Cálculo del aumento del sistema

3.2.3.1 Determinación de las lentes necesarias para el montaje

3.3 IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA

3.3.1 Brazo horizontal

3.3.2 Brazo Vertical

3.3.2.1 Creación del soporte para la lente de contacto

3.3.2.2 Montaje de la lente L2

3.3.2.3 Afocalidad de L2-L3

3.3.2.4 Conjugación pupilar

3.3.3 Incorporación de la cámara de video

3.4 MEDIDA DE LAS LENTES

4 RESULTADOS

4.1 RESULTADOS DE MEDIDA DEL FRENTE DE ONDA DE LENTES DE CONTACTO RGP

4.1.1 MEDIDA DEL FRENTE DE ONDA DE LENTES MONOFOCALES

4.1.2 MEDIDA DEL FRENTE DE ONDA DE LENTE PROGRESIVA

4.2 ANÁLISIS DEL ERROR SISTEMÁTICO INTRODUCIDO POR LA LÁMINA DE VIDRIO

5 DISCUSIÓN

6 CONCLUSIONES

7 BIBLIOGRAFÍA

1 INTRODUCCIÓN

Las lentes de contacto se utilizan comúnmente para compensar defectos refractivos como miopía, hipermetropía y astigmatismo.

El uso de las lentes de contacto es cada vez más frecuente debido, en parte, a la comodidad y a la estética que presentan frente a las lentes oftálmicas para algunos usuarios. Otras ventajas respecto a las lentes oftálmicas son, un mayor campo visual o la ausencia de efecto prismático y aberraciones en visión dinámica [1].

En el diseño de la zona óptica de las lentes de contacto monofocales se utilizan tanto superficies esféricas como asféricas, buscando, por una parte, adaptar la lente de contacto a la geometría corneal y, por otra parte, un buen comportamiento óptico, es decir, la corrección de las aberraciones de bajo orden. La zona óptica de este tipo de lentes viene caracterizada por su diámetro y los radios de curvatura de la cara anterior y posterior, en el caso de superficies esféricas. En el caso de superficies asféricas, además de los radios de curvatura se suele especificar la excentricidad de las superficies [1]. El método convencional para la medida de la potencia de las lentes de contacto es el frontofocómetro, con el que se mide la potencia respecto al vértice posterior de la lente.

En los últimos años se ha incrementado el interés por diseñar lentes de contacto personalizadas que permitan obtener una mejor calidad visual corrigiendo las aberraciones de alto orden del ojo, mediante el diseño de superficies irregulares. En este caso, se necesita una evaluación de las aberraciones de alto orden proporcionadas por la lente de contacto, por lo que no es suficiente su caracterización únicamente, mediante la medida de la potencia de vértice posterior [2].

Por otra parte, cada vez es más frecuente el diseño de lentes de contacto progresivas, en las cuales se intercalan zonas ópticas anulares con la potencia necesaria para compensar al ojo las aberraciones de bajo orden en visión lejana y en visión cercana [1]. En este caso, las superficies utilizadas en los diseños son más complejas que en el caso de las lentes de contacto monofocales y se hace necesario una caracterización más completa de su comportamiento óptico, incluyendo la medida de las aberraciones de alto orden.

En la actualidad existen varios métodos para medir aberraciones de alto orden de lentes de contacto. Por una parte tenemos los sistemas que analizan la superficie de la lente (por ejemplo, mediante un perfilómetro), y una vez conocida ésta, se calcula el frente de onda a la salida mediante software de trazado real de rayos, pero existen algunas limitaciones como la lentitud y el coste [3].

Por otro lado están los sistemas que, sin conocer la superficie de la lente, analizan el frente de onda a la salida de la lente. Este es el caso de la interferometría [3], en la que se utiliza luz coherente. Los métodos interferométricos no tienen el rango dinámico suficiente para medir grandes cantidades de aberración, por lo que no serían aptos para caracterizar ciertas lentes de contacto, por ejemplo, las diseñadas para compensar las aberraciones de alto orden en

queratoconos. Por esta razón, en ocasiones se opta por la medida del frente de onda a la salida de la lente con iluminación incoherente con un sensor Hartmann-Shack [2,4].

En el presente trabajo se va a diseñar y construir un sistema para medir el frente de onda en lentes de contacto RGP con un sensor Hartman-Shack. El sensor que utilizaremos e implementaremos en nuestro sistema es el Sensor de frente de onda “HASO” versión FIRST, que se muestra en la figura 1.



Figura 1. Imagen del sensor HASO FIRST de la empresa Imagine Optic.

El sensor consta de una matriz de microlentes rectangular 4,8 x 3,6 mm y un detector CCD. El haz de luz incidente se divide en múltiples haces elementales al atravesar la matriz de microlentes. Estos haces secundarios se focalizan en el detector CCD. Cuando el sensor mide un frente de onda plano, las microlentes proporcionan una distribución reticular de puntos en el detector. Como se puede ver en la figura 2, si por alguna razón el frente de onda incidente (imagen de la izquierda) no es plano, entonces cuando ese frente de onda incida sobre la matriz de microlentes cada una de ellas recibe una onda con una inclinación diferente, lo cual produce que la imagen no se forme en su eje, sino que se desvíe de manera proporcional a la pendiente con la que incide la onda, dando una distribución de puntos en la CCD diferente. Para determinar la fase de la onda incidente en el sensor el software del HASO debe determinar la posición de los puntos asociados a cada microlente y determinar su desviación respecto a la posición que se obtendría si el frente fuese plano [5].

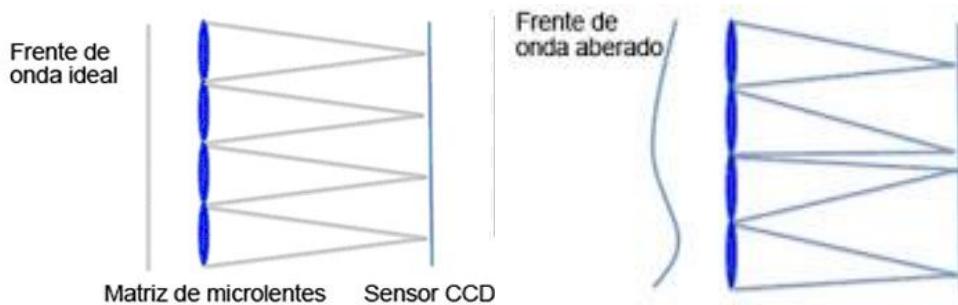


Figura 2. Esquema del principio de funcionamiento del sensor Hartman Shack [5]

El rango y la precisión de la medida dependen de dos factores [5]:

Por una parte del tamaño de la microlente, pues la mitad de dicho tamaño representa lo máximo que se puede desplazar su imagen, y de su distancia focal, pues cuanto más corta sea esta, mayor pendiente tendrá que tener el frente de onda medido para desplazar su imagen.

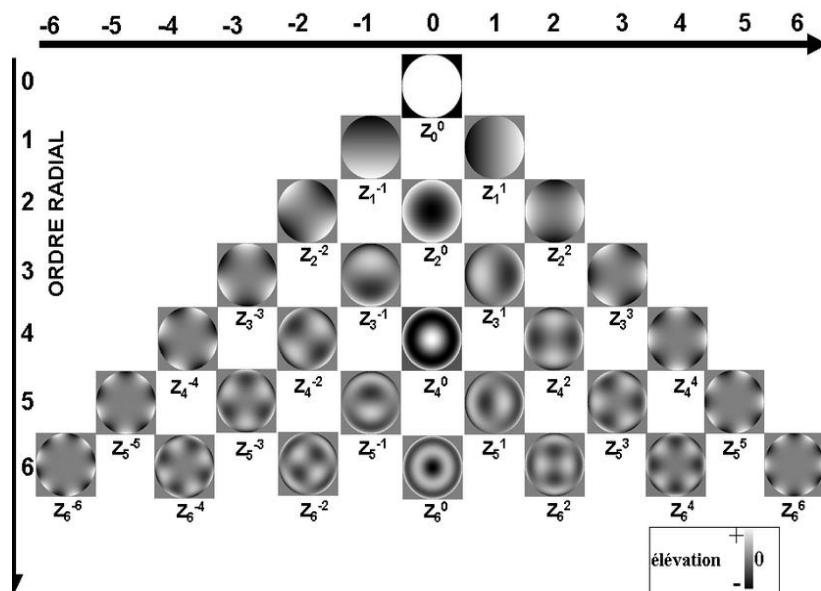
Por otro lado también depende de la posición del plano de la CCD, como podemos ver en la figura 2, si alejamos el plano de la CCD de las microlentes, la imagen se forma más lejos del eje de dicha microlente, con lo cual aumenta su precisión ya que el sistema será más sensible a menores desviaciones del frente de onda. Pero por otro lado, esto reduce el rango de medida ya que la imagen se puede salir antes de los límites de la microlente, cruzándose con la imagen de la microlente vecina.

Además de la reconstrucción del frente de onda a partir de la posición de los puntos en el plano de la CCD, el software del que dispone el HASO representa gráficamente el frente de onda mediante mapa de colores o interferograma y calcula los coeficientes del desarrollo del frente de onda en polinomios de Zernike hasta el orden $n=10$.

En la figura 3 se muestra la forma funcional general de los polinomios de Zernike y un esquema de la contribución de cada uno al frente de onda, hasta orden 6.

$$Z_n^m(\rho, \theta) = \begin{cases} N_n^m R_n^m(\rho) \cos(m\theta) & \text{para } m \geq 0 \\ -N_n^m R_n^m(\rho) \sin(m\theta) & \text{para } m < 0 \end{cases}$$

(a)



(b)

Figura 3. (a) Forma funcional de los polinomios de Zernike (b) Representación de los polinomios de Zernike hasta 6º orden.

Los términos hasta orden $n=2$ son los términos de bajo orden: inclinaciones, desenfoque y astigmatismo [6]. A partir de $n=2$ los términos se consideran de alto orden.

2 OBJETIVOS

Los objetivos principales de este trabajo son:

- Diseñar un sistema de medida de frente de onda para lentes de contacto RGP con un sensor Hartmann-Shack.
- Construir el sistema en un banco óptico con el material disponible en el laboratorio
- Analizar con el sistema construido el frente de onda a la salida de diferentes lentes de contacto, monofocales y progresivas.

3 METODOLOGÍA

3.1 PUESTA EN ORDEN Y CLASIFICACIÓN DEL MATERIAL DISPONIBLE

Antes de empezar a realizar el diseño del sistema, es necesario reunir todo el material disponible y clasificarlo. La puesta en orden es esencial, ya que el diseño del montaje depende de las piezas disponibles y en el caso de que se necesite alguna pieza en concreto y esté agotada habrá que comprarla.



Figura4. Piezas LINOS ordenadas

Todas las piezas que utilizaremos en el montaje serán de la marca Linos para asegurarnos el alineamiento de los elementos del sistema.

3.2 DISEÑO DEL SISTEMA

3.2.1 Diseño propuesto

En la figura 5 se muestra un esquema del diseño propuesto.

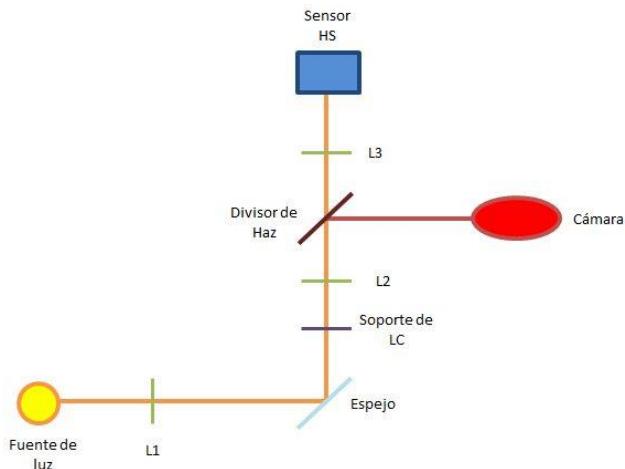


Figura 5. Esquema del diseño propuesto para la medición de frentes de onda de lentes de contacto.

El diseño consta de dos brazos:

El brazo horizontal que está compuesto por una fuente de luz con diafragma, una lente colimadora (L1) y un espejo. La función de L1 es crear una onda plana que llegue a la lente de contacto.

El brazo vertical está compuesto por un soporte de lentes de contacto, dos lentes (L2, L3), un divisor de haz y el sensor HASO. En conjunto, las lentes L2 y L3 se encargan de conjugar el plano de la LC y el plano de microlentes del Hartman Shack, logrando además el aumento necesario para ajustar el tamaño del frente de onda a la salida de la LC con el tamaño de la matriz de microlentes. El divisor de haz nos permitirá incorporar una cámara de video para asegurarnos el buen centrado de la lente de contacto.

3.2.2 Determinación de las dimensiones del sistema

Todo el sistema estará montado sobre una plataforma con agujeros de Linos (46x30cm), donde se fijarán todos los elementos de forma que el sistema sea portátil.

La dimensión del brazo vertical vendrá determinada por el soporte del sensor, ya que este sólo puede elevar el HASO hasta una altura de 40 cm sobre la plataforma.

3.2.3 Cálculo del aumento del sistema

La zona de la lente de contacto que queremos analizar es de 6 mm de diámetro y el tamaño de la matriz de microlentes del sensor es de 4,8 x 3,6 mm.

Hemos elegido un tamaño para analizar la lente de contacto de 6mm, ya que éste es el valor medio de diámetro para pupilas en condiciones de iluminación normales. [1]

Como la matriz de microlentes es rectangular, utilizaremos la dimensión más pequeña (3.6mm) para calcular el aumento. De esta manera, habrá una zona de la matriz de microlentes que no se utilizará, pero a cambio podremos medir el frente de onda en toda el área elegida de la LC. Si calculáramos el aumento para la dirección de tamaño de 4,8 mm, en la otra dirección habría una zona de 1,2 mm de la pupila de la cual no estaríamos obteniendo información. En la figura 6 se muestra un esquema con el trazado de rayos correspondiente a la conjugación de los planos de la lente de contacto y la matriz de microlentes.

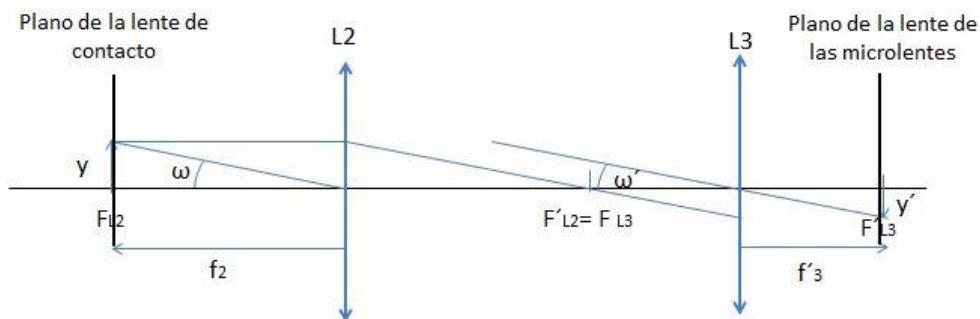


Figura 6. Esquema del trazado de rayos de la conjugación de la lente de contacto con la matriz de microlentes del sensor.

En la ecuación (1) se especifica el cálculo del aumento que ha de proporcionar el sistema de lentes L2 y L3. [7]

$$\beta = \frac{\tan \omega}{\tan \omega'} = \frac{y}{f_2} \div \frac{y'}{f'_3} \Rightarrow \frac{y'}{y} = \frac{f'_3}{f_2} \Rightarrow \frac{f'_3}{f_2} = \frac{3,6}{6} = 0,6x$$

(1)

3.2.3.1 Determinación de las lentes necesarias para el montaje

La elección de L1 vendrá determinada por la dimensión horizontal de 46 cm de la plataforma, por lo que no podremos elegir una lente de focal muy larga, por que ocupara mucho espacio y tenemos que dejar sitio al soporte del sensor. Tampoco nos conviene una lente con focal

pequeña ya que sería más susceptible a pequeños desplazamientos. De las lentes disponibles en el laboratorio elegimos una lente de 120 mm de focal.

La elección de las lentes L2 y L3 vendrá determinada, por una parte, por la relación de aumentos que se desea conseguir. Por otra parte, como hemos indicado antes, el brazo no debe superar los 40 cm de altura, además tenemos que tener en cuenta que la lente de contacto se encuentra a una altura de 130,6 mm de la plataforma y que la focal objeto de L2 tiene que estar en el plano de la lente de contacto, mientras que la matriz de microlentes se ha de encontrar sobre el foco imagen de L3. De forma que $130,6 + 2f'2 + 2f'3$ no debe sobrepasar los 40 cm.

En la figura 7 se muestra el esquema del brazo vertical y la distancia que como máximo puede haber entre el plano del soporte de la lente de contacto y la matriz de microlentes.

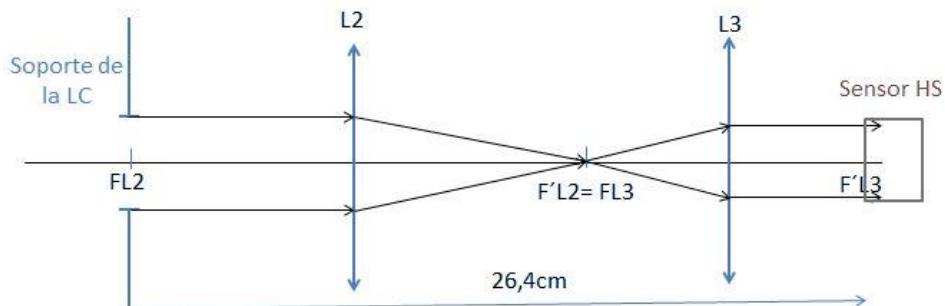


Figura 7. Esquema de las distancias de las focales, del brazo vertical.

En la tabla 1 se muestran las posibles combinaciones de lentes disponibles en el laboratorio, con las que se puede conseguir un aumento de 0.6X.

Tabla 1. En esta tabla hemos calculado las diferentes combinaciones de lentes de contacto, con sus respectivos aumentos y distancias focales.

Combinaciones	Focales	Aumento	Suma de focales
1	L2= 40mm L3= 25mm	$\beta = 0,625x$	130mm
2	L2= 80mm L3= 50mm	$\beta = 0,625x$	260mm
3	L2= 140mm L3=80mm	$\beta = 0,57x$	440mm

La combinación 1 queda descartada, ya que nuestro montaje no nos permite tener una distancia tan corta entre el soporte de la lente de contacto y la lente L2, por lo que no podría situarse la lente de contacto en su foco objeto de la L2.

Descartamos también la combinación 3, ya que su montaje sobrepasaría la altura máxima permitida.

Por tanto, de entre todas las combinaciones disponibles utilizaremos la combinación 2.

En la tabla 2 se resumen las distancias focales de las lentes escogidas para ambos brazos, horizontal y vertical.

Tabla 2. Lentes elegidas con sus correspondientes focales.

Lentes escogidas
L1 $f' = 120\text{mm}$
L2 $f' = 80\text{mm}$
L3 $f' = 50\text{mm}$

3.3 IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA

3.3.1 Brazo horizontal

Una vez decididas las lentes que van a formar parte del diseño, se procede al montaje experimental de ambos brazos.

En primer lugar fijaremos a la tabla la fuente de iluminación que llevará acoplado un diafragma para regular el tamaño del haz de luz que llegará a la lente de contacto. Como fuente de luz elegimos un LED que emite en 555 nm, de intensidad variable.

Necesitamos colocar la fuente de luz en el foco de la lente L1. Para ello utilizaremos el sensor HASO, colocándolo a la salida de la lente L1. Cuando la fuente de luz se sitúa en el foco objeto de la lente, a la salida debemos tener un haz plano. Por tanto, movemos la posición relativa entre la fuente y L1 hasta que el sensor mida un frente de onda con una contribución nula del término de desenfoque.

Para finalizar el montaje de este brazo introduciremos el espejo a 45º para desviar la onda plana hacia el brazo vertical.

En la figura 8 se muestra una fotografía del brazo horizontal una vez finalizado el montaje.

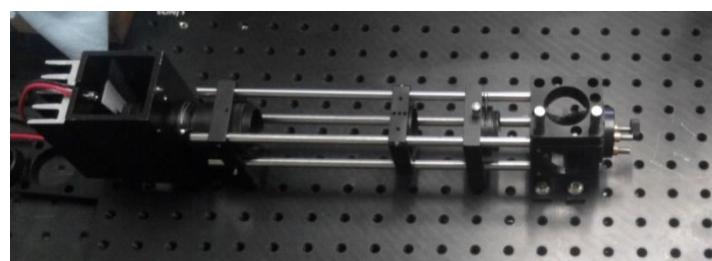


Figura 8. Fotografía del brazo horizontal una vez colimado.

3.3.2 Brazo Vertical

3.3.2.1 Creación del soporte para la lente de contacto

Como soporte para la lente de contacto montaremos una estructura a partir de las piezas disponibles en nuestro laboratorio. La estructura consta de tres micrométricos unidos entre sí, cada micrométrico se desplazara en una dirección (X, Y, Z), para garantizarnos libertad en el centrado.

Este soporte lo atornillaremos a nuestra plataforma de trabajo, de esta manera evitaremos que se nos mueva el soporte durante la medida. Sobre los micrométricos acoplaremos el soporte para sujetar la lente de contacto, que será una placa de anchura 10,21 mm con varios agujeros de 6 mm de diámetro donde poder colocar la lente de contacto.

En la figura 9 se muestra una fotografía de la estructura final.



Figura 9. En esta imagen tenemos el soporte de la lente de contacto y podemos diferenciar los tres micrométricos, la placa de sujeción, y la placa donde colocaran las lentes de contacto

Como las lentes de contacto que vamos a medir son lentes de contacto gas permeables, no hace falta que estén sumergidas en un líquido de mantenimiento durante la medida, por lo que este soporte satisface nuestras necesidades. Si se quisiera medir lentes de contacto blandas habría que diseñar otro tipo de soporte, en el cual se pudiera introducir este líquido para evitar su secado durante la medida.

3.3.2.2 Montaje de la lente L2

El siguiente paso en nuestro montaje es conseguir colocar el foco objeto de la L2 en el plano donde se situará la lente de contacto. Para ello utilizaremos la cámara de video enfocada al infinito. Colocando la cámara a la salida de la lente L2, podemos ajustar la distancia entre L2 y el soporte de la lente de contacto hasta que en la cámara veamos enfocados los bordes del

soporte. En ese momento, el plano del soporte estará situado en el plano focal objeto de la lente y su imagen a través de la lente estará en el infinito.

En la figura 10 podemos observar gracias al trazado de rayos, la situación del foco de L2 respecto al plano de la lente de contacto, obteniendo así a la salida de L2 tenemos una onda plana.

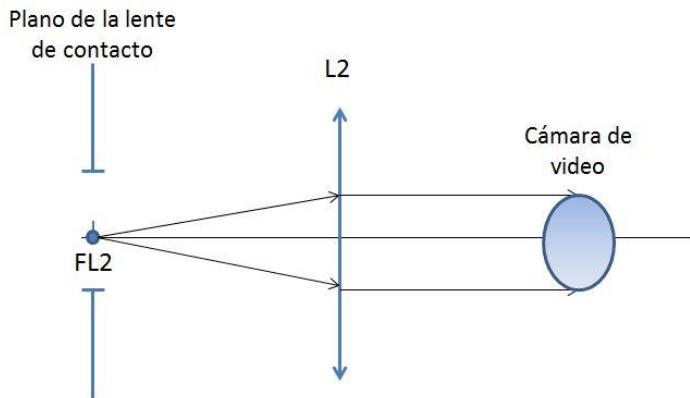


Figura 10. Trazado de rayos correspondiente al ajuste de la distancia entre el soporte de la lente de contacto y L2.

3.3.2.3 Afocalidad de L2-L3

La finalidad de esta parte del montaje es conseguir que la focal objeto de L3 coincida con la focal imagen de L2 para conseguir una onda plana.

El procedimiento a seguir será como el que llevamos a cabo para la colimación del brazo horizontal. Una vez que tengamos la L2 en su posición correcta es decir, con su foco objeto sobre la lente de contacto, ajustaremos la posición de L3 con ayuda del sensor HASO. Colocamos el sensor HASO a la salida de L3 y desplazamos ésta hasta que consigamos que el frente de onda a la salida tenga un término de desenfoque igual a 0, es decir, que a la salida el frente de onda sea plano. En este momento tendremos el foco objeto de L3 coincidiendo con el foco objeto de L2.

3.3.2.4 Conjugación pupilar

La finalidad de esta parte del montaje es formar imagen del plano donde se sitúa la lente de contacto sobre el plano de la matriz de microlentes. Para ello, como la posición del soporte, L2 y L3 ya están determinadas, desplazaremos el sensor HASO. Sabremos que la matriz de microlentes está en la posición adecuada cuando el tamaño de la imagen del agujero soporte de la lente de contacto vista por el sensor sea independiente de la potencia de la lente de

contacto que coloquemos. Al colocar una lente de contacto de potencia elevada en el soporte, observaremos que el tamaño de la pupila en el sensor ha variado, esto quiere decir, que no hay conjugación pupilar y que la matriz de microlentes no está situada en el foco imagen de L3.

Si el tamaño de la pupila con la lente puesta es más grande, esto querrá decir que habrá que desplazar hacia abajo el sensor, que es donde se encuentra el foco imagen. Si en cambio el tamaño de la pupila con la lente puesta es más pequeño, esto querrá decir que habrá que desplazar hacia arriba el sensor, que es donde se encuentra el foco imagen.

3.3.3 Incorporación de la cámara de video

La función de la cámara de video será, ayudarnos en el centrado de la lente de contacto. Este centrado es importante ya que si la lente está descentrada mediremos cada vez un frente de onda diferente.

Enfocaremos la cámara para un objeto en el infinito, observando un punto lejano y enfocándolo manualmente. Introducimos en el brazo horizontal una lámina de vidrio a 45º entre L2 y L3, de forma que deje pasar la mayor parte de la luz hacia L3 y el sensor HASO y refleje parte de la luz dirigiéndola hacia la cámara.

La cámara tiene que estar a la misma altura que la lámina de vidrio, de manera que gracias a los rayos reflejados por el divisor, podamos observar la lente de contacto.

En la figura 11 podemos observar como los rayos de L2 salen hacia el infinito reflejándose los rayos en la lámina, llegando así finalmente a la cámara enfocada también a esta distancia.

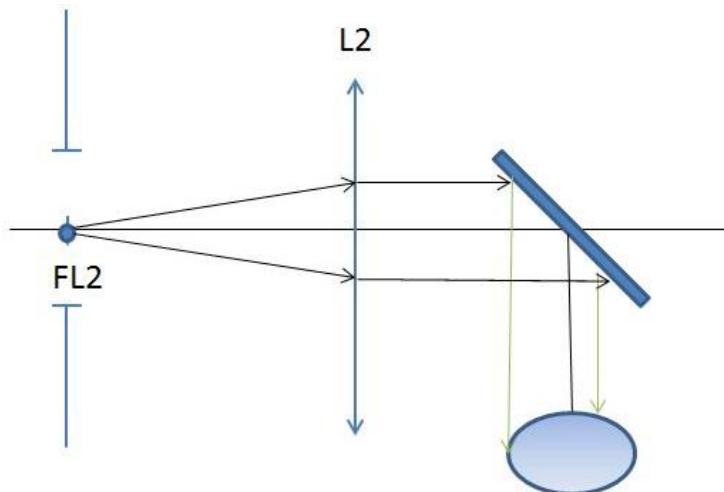


Figura 11. Esquema de la formación de imagen del plano de la lente de contacto en la cámara de video.

Finalmente fijaremos la cámara de video a la placa, en la figura 12 se muestran dos fotografías del soporte elegido para cámara.

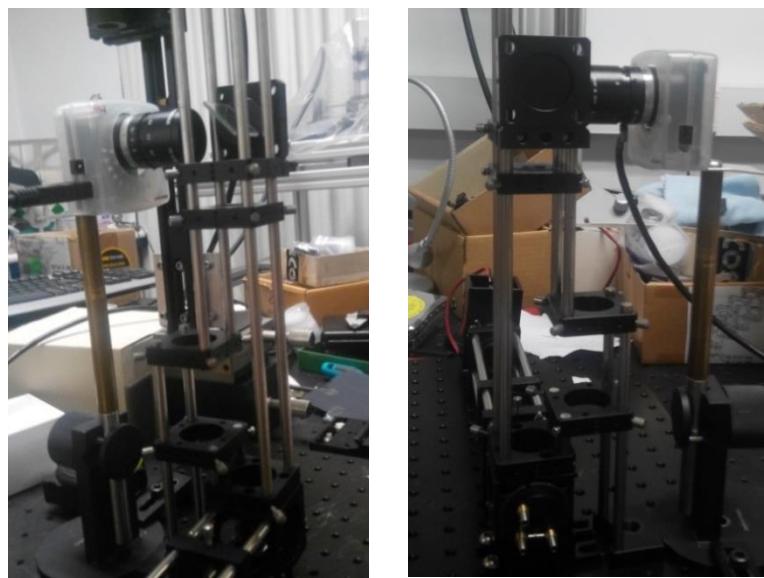


Figura 12. Fotografías del soporte dispuesto para la cámara y la lámina de vidrio.

El sistema ya está preparado para poder empezar a realizar medidas.

3.4 MEDIDA DE LAS LENTES

Para ilustrar el funcionamiento del sistema de medición de frente de onda, mediremos tres lentes de contacto RGP monofocales, una de ellas astigmática, y una lente progresiva.

Antes de proceder a realizar las medidas, tendremos que someter a una limpieza exhaustiva las lentes de contacto que queramos analizar, debido a que una simple gota de agua que esté presente en la superficie de nuestra lente impide que, el sensor realice adecuadamente la medida del frente de onda en esa zona.

La limpieza de las lentes de contacto se llevará a cabo con jabón, en nuestro caso utilizaremos el Avizor GP y las aclararemos con disolución salina Avizor Saline.

El secado lo realizaremos en primer lugar depositando la lente en un papel absorbente, para que éste absorba la mayor parte del agua, y finalmente con un spray de aire comprimido nos desharemos de los restos de agua que queden.

Para realizar la medida se coloca la lente de contacto en uno de los agujeros del soporte descrito en el apartado 3.3.2.1. Con ayuda de la cámara, centramos la lente en el agujero y gracias a los micrométricos del soporte centramos la lente en el campo de la cámara.

4 RESULTADOS

4.1 Resultados de medida de frente de onda en lentes de contacto RGP

En la figura 13 se muestran los mapas de frente de onda medido con el sensor HASO cuando no hay lente de contacto en el soporte. Se muestra por separado el mapa correspondiente a los términos de bajo orden y los de alto orden, junto con el valor de RMS.

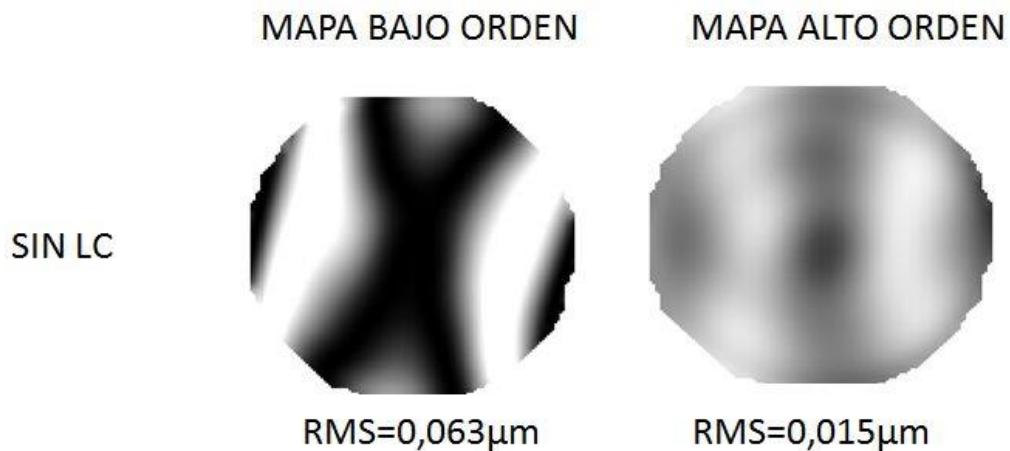


Figura 13, Frentes de onda de bajo y alto orden tomados por el HASO sin lente

El valor RMS es la cantidad de desviación del frente de onda real respecto al ideal por lo que a mayor RMS, mayor aberración y peor calidad visual [8].

En el mapa de bajo orden podemos observar un astigmatismo y no presenta aberraciones de alto orden. En cualquier caso el RMS cumple la ley de Marechal, estando nuestro sistema limitado por difracción.

El sistema está limitado por difracción cuando la RMS < λ/14 [8]

4.1.1 MEDIDA DEL FRENTE DE ONDA DE LENTES MONOFOCALES

Realizaremos medidas en 3 lentes de contacto monofocales: Una lente negativa de alta potencia, una lente negativa de potencia media y una lente tórica.

A partir de los coeficientes de los polinomios de Zernike obtenidos con el sensor HASO, calculamos la vergencia del frente de onda en el plano de las microlentes [9]. Para poder comparar esta vergencia con la potencia esferocilíndrica de la lente, se ha de aplicar un factor de conversión igual al factor de aumento del sistema al cuadrado.

En la tabla3 se muestran los resultados del cálculo de potencia de las lentes a partir de los coeficientes de Zernike obtenidos con el sensor HASO y los resultados de medida de potencia de las lentes con el frontofocómetro.

Tabla3. Potencia esferocilíndrica de las lentes monofocales calculadas a partir de los coeficientes de Zernike obtenidos por el sensor HASO y obtenidas con el frontofocómetro.

	Esfera del sensor	Cilindro del sensor	Potencia del frontofocómetro
SIN LC	0,012	-0,049	0
LENTE1	-9,451	-0,062	-10,25 esf
LENTE2	-2,662	-0,041	-3,25 esf
LENTE3	-2,397	-1,011	-2,75 esf-1.00cil 22º

En la figura 14 se muestran los interferogramas correspondientes a la medida del frente de onda de cada una de las tres lentes monofocales, considerando los términos de bajo orden y de alto orden por separado. Junto a cada mapa se muestran los valores de RMS.

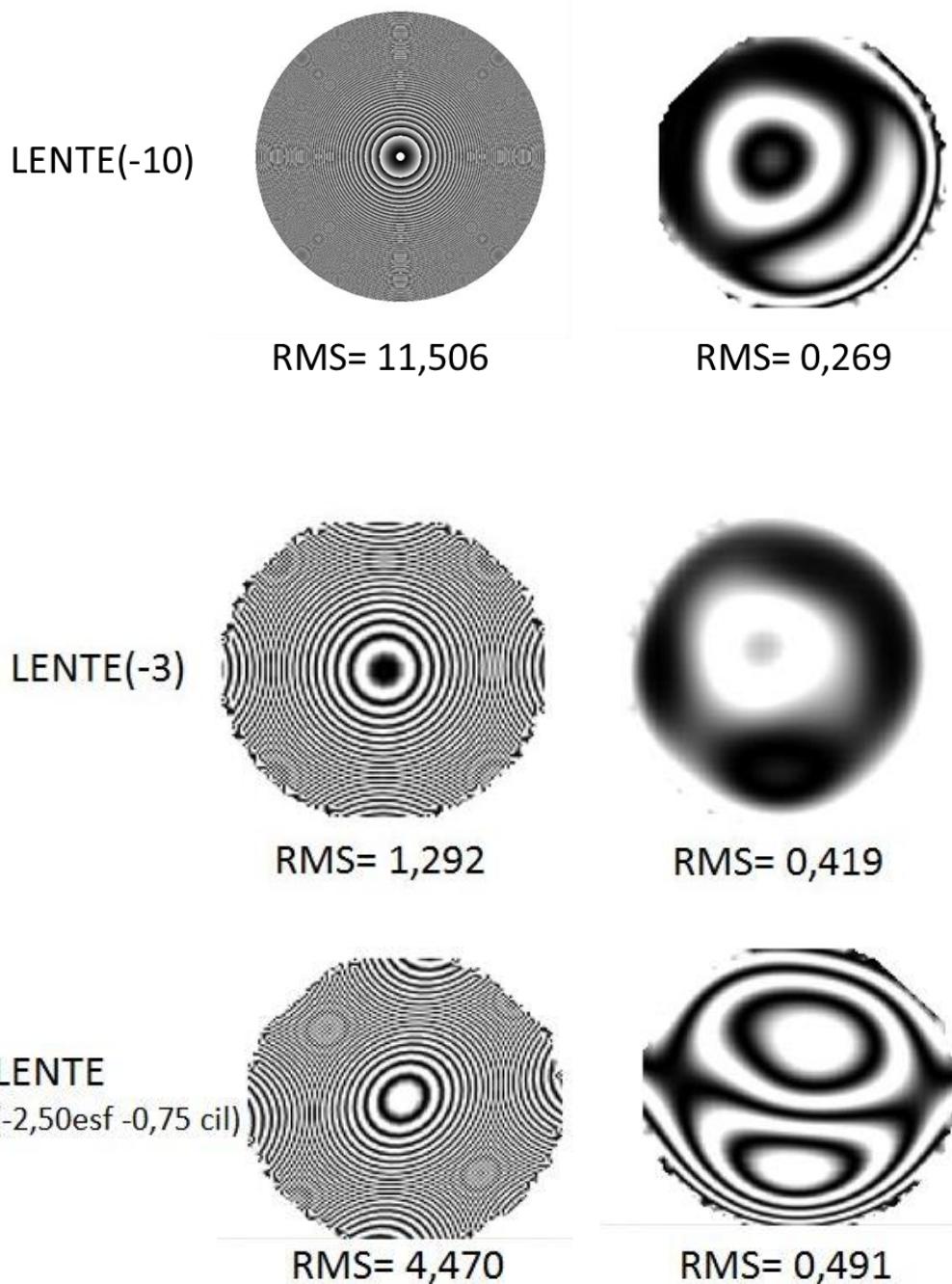


Figura 14, Interferogramas del frente de onda de las lentes monofocales

En el caso de las lentes 1 y 2, en los mapas de bajo orden se puede ver claramente la contribución de desenfoque y la del astigmatismo en el caso de la lente 3. En cuanto a las aberraciones de alto orden, es especialmente llamativo el mapa de la lente 3, en la que se aprecia claramente coma.

4.1.2 RGP progresiva

En la figura 15 se muestra el interferograma correspondiente a la medida del frente de onda de la lente de contacto progresiva, considerando los términos de bajo orden y de alto orden por separado. Junto a cada mapa se muestran los valores de RMS.

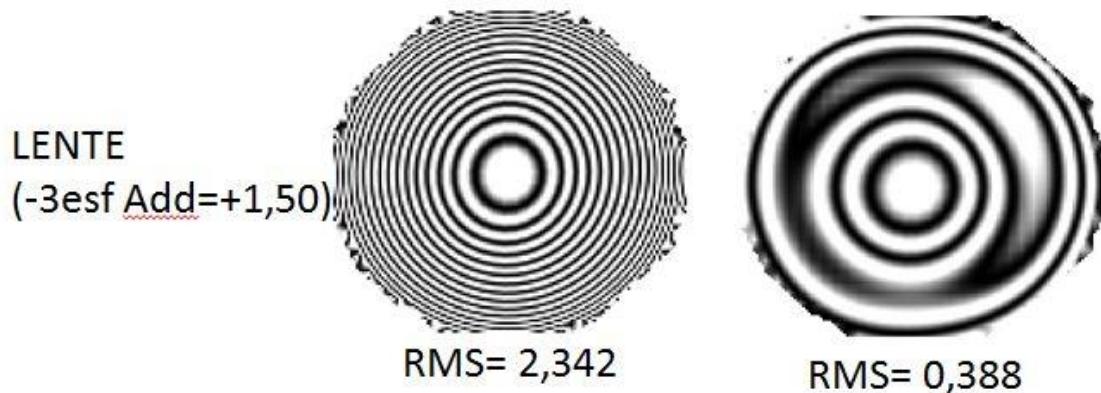


Figura 15, Interferograma del frente de onda de la lente progresiva

En el mapa de bajo orden se puede ver claramente la contribución de desenfoque. En cuanto a las aberraciones de alto orden, en la que se aprecia claramente esférica.

4.2 ANÁLISIS DEL ERROR SISTEMÁTICO INTRODUCIDO POR LA LÁMINA DE VIDRIO

Para introducir la cámara de vídeo que facilita el centrado de la lente de contacto es necesario introducir una lámina de vidrio que actúa como divisor de haz. El haz atraviesa la lámina tras salir de la lente L2 con una cierta vergencia que depende también de la potencia de la lente de contacto que se coloque en el soporte. Esta lámina puede introducir astigmatismo en el haz transmitido, cuya magnitud puede depender de los parámetros de la lámina, como el espesor, el índice, de la inclinación de la lámina y de la vergencia de los rayos al incidir sobre la ésta [10].

El espesor y el índice de la lámina no varía, ya que será siempre la misma durante la realización de las medidas, la inclinación del divisor tampoco variará ya que lo mantendremos fijo durante todo el proceso de medición, por lo que el único parámetro que puede variar es la vergencia de los rayos a la entrada de la lámina.

Analizaremos con el programa Oslo, como varía el astigmatismo inducido por el divisor de haz, al poner lentes de contacto de diferentes potencias, es decir calcularemos el astigmatismo inducido para diferentes vergencias.

El astigmatismo inducido lo calcularemos en el plano donde se encuentra la matriz de microlentes del sensor, una vez atravesada la lente L3. De esta manera calculamos el astigmatismo de la lámina respecto al mismo plano que calcula el sensor los polinomios de Zernike. En este caso, tanto L2 como L3 se consideran lentes delgadas en aproximación paraxial, de forma que sólo analizamos las aberraciones introducidas por la lámina de vidrio.

En la tabla 4 se muestran los valores de error esferocilíndrico introducido en el haz de salida del sistema por la lámina de vidrio.

Tabla 4. Error esferocilíndrico inducido por la lámina divisora para cada potencia de lente de contacto.

POTENCIA	VALOR ESFEROCILINDRICO INDUCIDO
+10	-0,109 esf -0.093 cil 180º
+5	-0,125 esf -0.109 cil 180º
+2.5	-0,109 esf -0,093cil 180º
0	-0,109 esf -0.078 cil 180º
-2.5	-0,109 esf -0.078 cil 180º
-5	-0,109 esf -0.078 cil 180º
-10	-0,109 esf -0.078 cil 180º

En la tabla 4 podemos observar como el astigmatismo inducido dependerá de la potencia de la lente de contacto, siendo mayor en lentes positivas que en las negativas, ya que en el caso de medida de lentes de contacto positivas la vergencia a la entrada de la lámina es mayor. En cualquier caso, los valores de astigmatismo se mantienen por debajo de las 0.1D.

Observamos como también además de astigmatismo la lámina de vidrio induce un error esférico, que es constante para todas las potencias, excepto para la potencia de +5D, aunque en todos los casos los valores se mantienen por debajo de 0.125D.

5 DISCUSIÓN

En la tabla 3 se observan diferencias entre los valores de potencia de la lente calculados con el sensor HASO y los calculados con el frontofocómetro. Estas diferencias pueden deberse principalmente a dos causas: Por una parte, no disponemos de un soporte para la medida de lentes de contacto en el frontofocómetro, con lo que no podemos asegurar que el vértice posterior de la lente quede adecuadamente apoyado en el soporte del frontofocómetro. Por esta razón, los valores al medir lentes negativas con el frontofocómetro pueden salir más negativos de lo que realmente son [7]. Este error es mayor cuanto mayor es la potencia de la lente a medir, por lo que será mayor en el caso de la lente 1. Por otra parte, el valor calculado a partir de los coeficientes de Zernike obtenidos con el HASO ha de multiplicarse por un factor de corrección (igual al cuadrado del aumento). Este factor de corrección está calculado teóricamente con el valor nominal de potencia de las lentes L2 y L3, lo que puede introducir error en el cálculo de la potencia. En cuanto a la lente progresiva, el valor de RMS de alto orden es mayor que en las lentes monofocales, observándose en el mapa contribución de la aberración esférica y el coma.

En cuanto a los datos del astigmatismo introducido por la lámina de vidrio, lo esperado a la hora de recoger los datos es que la lámina nos introdujera una pequeña cantidad de astigmatismo y esfera inducida por la inclinación de la misma, que además variará según la potencia de la lente de contacto. Como se puede observar en el mapa de aberración de bajo orden sin lente (figura 13), aparece astigmatismo de bajo orden. En la tabla 4 se comprueba que, aunque el valor del astigmatismo es mayor en potencias positivas, ya que la vergencia de entrada en la lámina en estos casos será mayor, su valor es menor de 0.1D.

La lámina introduce también un error esférico similar en todas las potencias estudiadas, exceptuando para la lente de +5, en la que este valor es mayor que en el resto, al igual que pasaba con el valor de astigmatismo. Esto es debido a que la imagen proporcionada por L2 es la que más cerca cae de la lámina plano paralela de todos los casos, por lo que con ésta lente los rayos llegan con mayor vergencia a la lámina, induiéndonos así mayor esfera y astigmatismo.

Si hubieran sido iguales todos los valores de esfera y astigmatismo inducido podríamos haber compensado este defecto con una lente, pero como podemos observar el defecto esférico y astigmático nos varía también según la potencia por lo que esta solución no sería correcta.

Si fuéramos a medir sólo lentes de contacto negativas se podría poner una compensación esferocilíndrica de este valor para anular el efecto de la esfera y el astigmatismo inducido. Aunque no es necesario ya que como hemos calculado el astigmatismo inducido respecto al plano donde se encuentra el Hartmann Shack podríamos descontarlo directamente del valor esferocilíndrico, obtenido a partir de los Zernikes.

6 CONCLUSIÓN

En este trabajo hemos realizado el diseño, de un sistema para la medida de frente de onda en lentes de contacto RGP con un sensor Hartman Shack. Tanto en el diseño como en el montaje del sistema se ha tenido en cuenta el material del que se dispone en el laboratorio.

Para ilustrar el funcionamiento y las posibilidades de medida del sistema, se han medido cuatro lentes de contacto, tres monofocales y una progresiva. Se ha analizado la influencia de la lámina de vidrio introducida para facilitar el centrado de la lente, hallando que el error esferocilíndrico que provoca depende de la potencia de la lente de contacto a medir, aunque los valores se mantienen iguales o por debajo de 0.125D.

7 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Carlos Luis Saona Santos, "Contactología clínica", Elsevier, España (2002).
- [2] T.M. Jeong, M. Menon, G. Yoon , "Measurement of wave-front aberration in soft contact lenses by use of a Shack–Hartmann wave-front sensor", *Appl. Opt.*, 44, 4523-4527 (2005).
- [3] (T.Sharp), Arizona State University Corporation,[18-2-2015].
Disponible en la página web: <http://le-csss.asu.edu/profilometry>
- [4] C.Y Huang, "Measurement and Comparison of Progressive Addition Lenses by Three Techniques". Thesis Graduate Program in Vision Science, The Ohio State University (2011).
- [5] A. B. Galindo, "Montaje y calibrado de un aberrómetro clínico de tipo Hartmann-Shack"
Tesis de Máster, Universidad de Murcia (2008).
Disponible en la página web:
https://digitum.um.es/jspui/bitstream/10201/5743/1/Tesis%20de%20m%C3%A1ster_Montaje%20y%20calibrado%20de%20un%20HS%20cl%C3%ADnico.pdf
- [6] Y. M. Barbosa, "El frente de onda y su representación con polinomios de Zernike", *Ciencia y Tecnología para la Salud Visual y Ocular* 9, 145-166 (2011).
- [7] M. Martínez Corral, "Instrumentos ópticos y optométricos: teoría y prácticas" Universitat de València, España (1998).
- [8] Justiniano Casas, "Óptica" Universidad de Zaragoza, España (1985).
- [9], S. A. Comastri, K. Bastida, G. Martin, A. Bianchetti, "Aberrometrías oculares y de otros sistemas ópticos: transformación de coeficientes Zernike al contraer y desplazar transversalmente la pupila", Documento de Trabajo N° 208, p 3 Universidad de Belgrano, 2008.
Disponible en la página web: http://www.ub.edu.ar/investigaciones/dt_nuevos/208_comastri.pdf
- [10] Rodríguez García, José, "Principios y leyes fundamentales", "Fundamentos de óptica geométrica", Servicio de publicaciones, p: 40, 50, ISBN: 84-8371-004-3, Universidad de Oviedo, 1997.