



Frontofocómetro automático

*Núria Tomàs
Montserrat Arjona
Josep Arasa*

Centro de Desarrollo de Sensores, Instrumentación y Sistemas (CD6)
Universitat Politècnica de Catalunya
tomas@oo.upc.es

En la actualidad cada vez son más los instrumentos automáticos que están presentes en la vida profesional del óptico-optometrista. En general, estos instrumentos son de muy fácil uso, realizan las medidas con gran rapidez y los resultados que proporcionan son aceptables para el uso que se les requiere, pero también es cierto que la mayoría de usuarios desconocen su funcionamiento. Para ellos no son más que una "caja" que, de forma casi mágica, dan un resultado. Los instrumentos automáticos incorporan diversos componentes ópticos, mecánicos, electrónicos e informáticos que debidamente conjuntados proporcionan el valor de la medida y la muestran al usuario ya sea a través de la pantalla del propio instrumento o bien mediante un impreso. De los diversos instrumentos optométricos automáticos que se utilizan de forma habitual en la práctica diaria de la optometría, hemos elegido el frontofocómetro. A lo largo del artículo se explicará de forma sencilla el diseño óptico básico, el principio de funcionamiento y de medida tanto para lentes esféricas como tóricas.

Frontofocómetro automático. Diseño básico

El frontofocómetro automático es un instrumento que proporciona de forma automática la medida de la potencia de vértice posterior (PVP) de una lente oftálmica. Es decir, una vez que el usuario ha situado correctamente la lente en el soporte que lleva incorporado el instrumento, es el propio instrumento el que proporciona la medida de la potencia de vértice posterior sin intervención alguna del óptico-optometrista.

En el presente artículo se describe el diseño básico y el principio de funcionamiento de un frontofocómetro automático genérico sin centrarse en ningún frontofocómetro comercial concreto. Nuestro interés consiste en hacer

comprensible el proceso básico que rige el funcionamiento de un frontofocómetro automático y no en realizar un estudio comparativo entre distintos modelos comerciales.

Los principios que rigen el funcionamiento de los frontofocómetros automáticos son completamente distintos a los que rigen los frontofocómetros manuales y, en consecuencia, el diseño de un frontofocómetro automático también es completamente distinto al de un frontofocómetro manual.

Cuando se utiliza un frontofocómetro manual, el óptico-optometrista realiza la lectura de la potencia de vértice posterior cuando ve nítida la imagen del test ya sea a través del ocular, en el caso del frontofocómetro de visión directa, o en la pantalla si se emplea un frontofocómetro de proyección. Así, la medida a partir de un frontofocómetro manual se efectúa siempre



basándose en una decisión del usuario, es decir, el usuario decide cuando la imagen del test se ve nítida y a continuación realiza la lectura.

En cambio, cuando se emplea un frontofocómetro automático, el usuario sólo interviene en el momento de situar correctamente la lente en el frontofocómetro, a partir de este momento ya no interviene más y por supuesto tampoco toma ninguna decisión que afecte al proceso de medida y al resultado hallado. Como es el instrumento el que toma las medidas, debe poseer un procedimiento que determine en qué momento y cómo debe realizar las lecturas. Así pues, el instrumento debe diseñarse de tal forma que pueda discernir automáticamente las condiciones bajo las que está trabajando y a partir de ellas realizar la lectura de forma autónoma.

En la figura 1 se representa uno de los diseños ópticos más sencillos de frontofocómetro automático que permitirá comprender fácilmente su funcionamiento. Consta de: una abertura circular (objeto) bien iluminada, dos lentes convergentes (L_1 y L_2), dos diafragmas (D_1 y D_2), un soporte para la lente problema y un sensor electrónico de imagen (CCD).

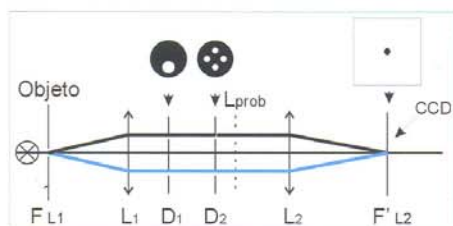


Fig. 1. Esquema básico de un frontofocómetro automático.

La disposición entre los elementos es la siguiente:

- El objeto está situado en el plano focal objeto de la lente L_1 (F_{L1})
- El sensor CCD está situado en el plano focal imagen de la lente L_2 (F'_{L2})
- Los diafragmas y el soporte de la lente problema están comprendidos entre ambas lentes

De cara a la comprensión del funcionamiento del sistema, es importante hacer hincapié en la forma de los dos diafragmas: D_1 consta de una

sola abertura descentrada, mientras que D_2 consta de cuatro aberturas uniformemente distribuidas.

Principio de funcionamiento

El principio de funcionamiento del frontofocómetro automático se basa en determinar el valor de la desviación de un haz de luz cuando se introduce la lente problema en su camino. Este valor se halla a partir de la capacidad que tiene el sensor de imagen de determinar en qué punto de su superficie llega el haz de luz.

No es necesario tener nociones de electrónica, o informática, para comprender el mecanismo de lectura del frontofocómetro automático ya que se basa en un principio óptico, principio que analizaremos con detalle. A pesar de esto, de la parte electrónica cabe mencionar que el sensor de imagen está formado por una matriz de CCD (Charge Coupled Device), donde cada uno de sus elementos transforma la luz recibida (fotones) en señal eléctrica (electrones). A través de la señal eléctrica es posible cuantificar la luz y determinar en qué punto del plano imagen ha incidido dicha luz.

Antes de entrar en detalles observemos (fig. 1) que, si no está presente el diafragma D_1 , el diafragma D_2 divide el cono de luz proveniente del objeto en cuatro haces de luz y que después de atravesar la lente L_2 todos ellos coinciden en un único punto imagen sobre el plano del CCD.

Para entender el principio de funcionamiento se verá, en primer lugar qué ocurre cuando se coloca una lente esférica de potencia positiva en el sistema. La figura 2 ilustra la marcha de rayos en este caso, considerando que momentáneamente no está presente el diafragma D_1 . Al introducir la lente problema, la vergencia del haz de rayos procedentes del diafragma D_2 aumenta con respecto a la vergencia sin lente problema. Así, en el plano del CCD aparecen cuatro puntos iluminados en vez de uno solo, como ocurría en el caso anterior. Por último, se observa que el desplazamiento de los cuatro haces es de la misma magnitud ya que la lente es esférica.

Si la lente problema es negativa, el efecto que se produce es similar, (fig. 3), pero en este caso la vergencia de la luz es menor y los cuatro haces procedentes del diafragma D_2 también son interceptados por el plano CCD y dan lugar a cuatro puntos iluminados pero no se cruzan antes de llegar al CCD.

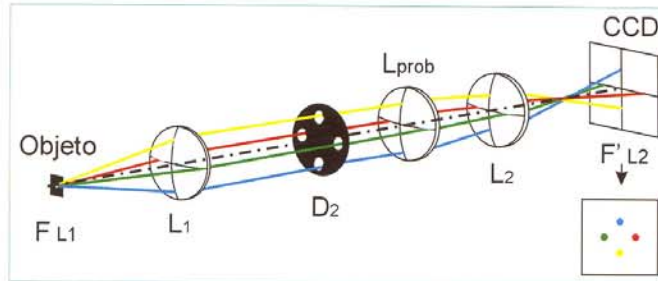


Fig. 2. Marcha de rayos en un frontofocómetro automático (sin el diafragma D_2) cuando hay presente una lente problema esférica positiva.

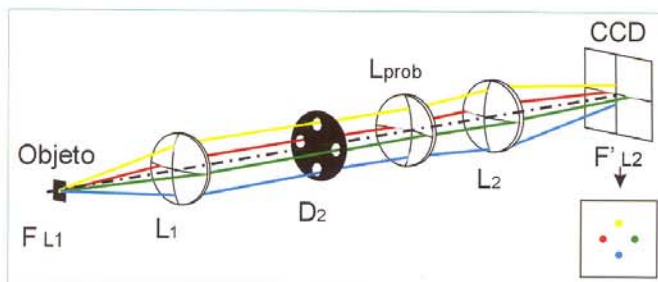


Fig. 3. Marcha de rayos en un frontofocómetro automático (sin el diafragma D_2) cuando hay presente una lente problema esférica negativa.

Aparentemente el resultado final en ambos casos es igual, es decir, en el plano del CCD aparecen cuatro puntos equidistantes iluminados, sin embargo existe una sutil diferencia: la procedencia de los cuatro puntos luminosos es distinta. Este efecto se pone de manifiesto en las figuras 4A y 4B en las que se ha coloreado en azul el rayo inferior. Si la lente problema es positiva (fig. 4A) el haz procedente de la abertura inferior del diafragma D_2 incide en la parte superior del CCD en cambio si la lente es negativa (fig. 4B), el mismo haz incide en la parte inferior del CCD. Este tipo de comportamiento ocurre para todos los rayos.

Así pues, queda patente que aunque siempre aparecen cuatro puntos iluminados en el CCD su procedencia es distinta e indica si la potencia de la lente problema es positiva o negativa. ¿Cómo puede el

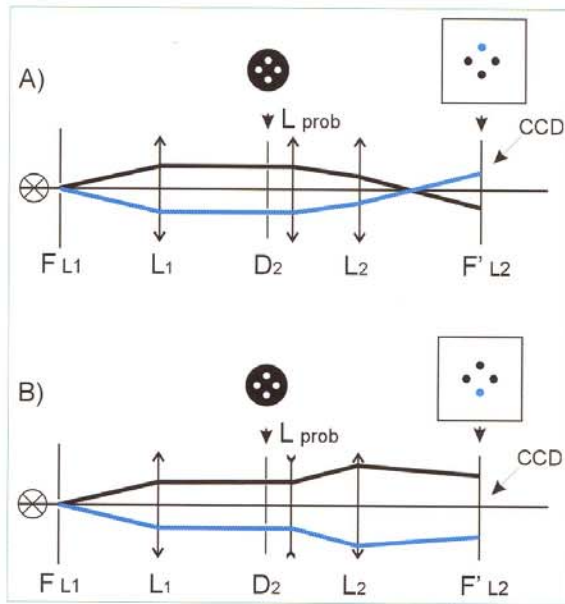


Fig. 4. Marcha de rayos en un frontofocómetro automático, en A) cuando está presente una lente problema positiva y en B) cuando está presente una lente problema negativa.

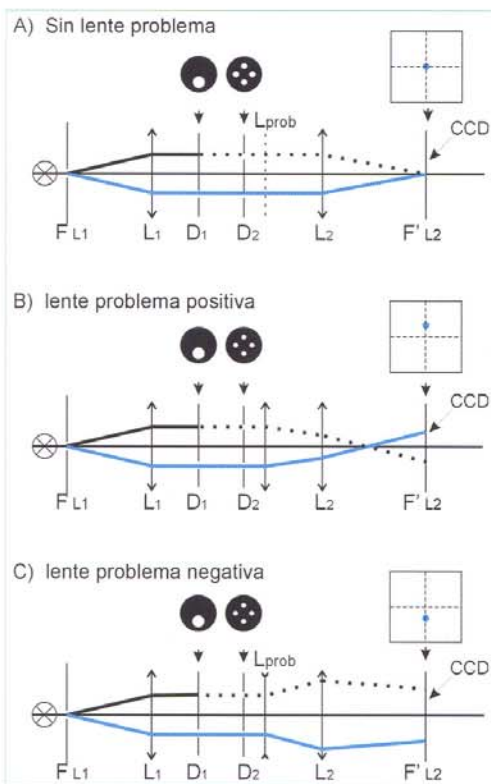


Fig. 5. Marcha de rayos en un frontofocómetro automático donde se pone de manifiesto la función del diafragma D_1 . A) cuando no hay lente problema. B) cuando se introduce una lente problema positiva y C) cuando se introduce una lente problema negativa.

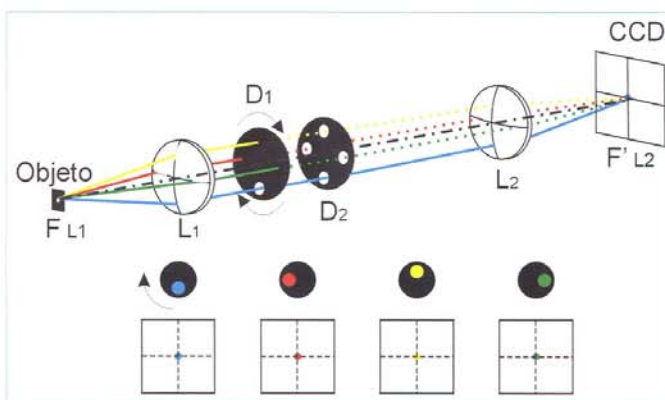


Fig. 6. Secuencia de posiciones del haz sobre el CCD a medida que el diafragma D_1 gira (sin lente problema).

instrumento discernir dicha procedencia y por consiguiente determinar el signo de la potencia de la lente problema? Para responder a esta pregunta es necesario introducir el diafragma D_1 , que de momento no habíamos considerado.

La figura 5 presenta un esquema simplificado en dos dimensiones en el que se ha incorporado el diafragma D_1 . En la figura 5A no hay lente problema y se observa que debido a la presencia del diafragma D_1 tan sólo pasa uno de los cuatro haces que incidirá en el centro del plano del CCD, al igual que ocurría en la figura 1. Al introducir una lente problema, sea positiva o negativa, el haz se desviará en función de la potencia de la lente, pero gracias a que sólo hay un haz presente, se pueden diferenciar los dos casos. Así, figura 5B, para una lente positiva cuando la abertura del diafragma D_1 está en la parte inferior el haz incide en la parte superior del CCD mientras que para una lente negativa, figura 5C, cuando la abertura del diafragma D_1 está en la parte inferior el haz incide en la parte inferior del CCD.

Si además el diafragma D_1 gira, en el plano del CCD irán apareciendo de forma consecutiva los distintos puntos luminosos cada vez que la abertura de D_1 este alineada con uno de las cuatro aberturas de D_2 . Si no se coloca la lente problema, los haces luminosos siempre incidirán en el centro del CCD, independientemente de la posición del diafragma D_1 (fig. 6). Si está presente una lente problema, positiva o negativa, irán apareciendo los cuatro puntos luminosos sobre el CCD pero siguiendo una secuencia bien definida y distinta según la potencia de la lente sea positiva o negativa. En la figura 7A se ha

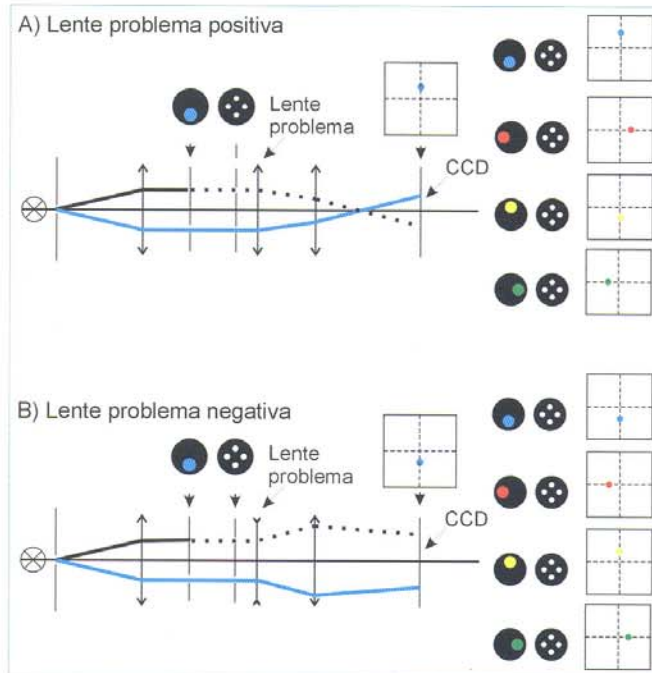


Fig. 7. Secuencia de posiciones del haz sobre el CCD a medida que el diafragma D, gira. A) cuando hay presente una lente problema positiva y B) cuando hay presente una lente problema negativa.

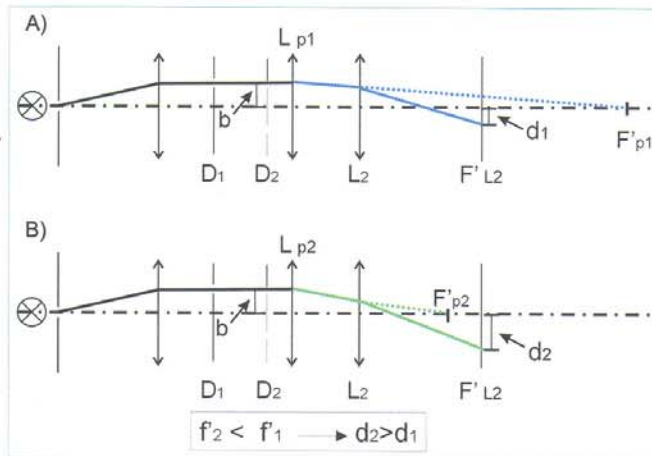


Fig. 8. Esquema en el que se muestra la desviación del haz de luz en función de la potencia de la lente problema. Una lente esférica de menor potencia (A) introduce una desviación menor que una lente esférica de mayor potencia (B).

representado el caso de una lente problema positiva, cada haz se ha coloreado y sobre el CCD aparecen en el siguiente orden (empezando por el punto superior y siguiendo el sentido de las agujas del reloj): azul, rojo, amarillo y verde.

En la figura 7B se ha representado el caso de una lente problema negativa y el orden de aparición sobre el CCD (con el mismo origen y sentido que el caso anterior) es: amarillo, verde, azul y rojo.

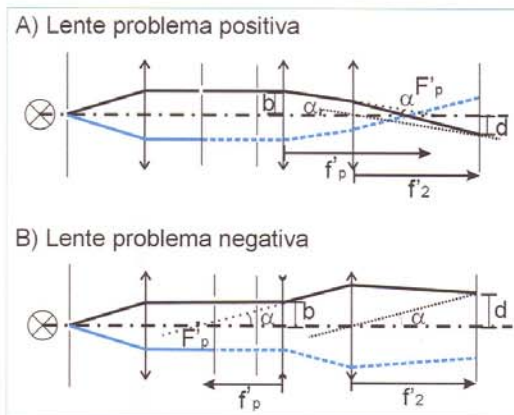


Fig. 9. Esquema de las relaciones trigonométricas necesarias para hallar la potencia de una lente esférica. A) para una lente positiva y B) para una lente negativa.

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{d}{f'_2} \quad \operatorname{tg} \alpha = \frac{b}{f'_p} \quad [1]$$

Igualando ambas expresiones se halla el valor de la distancia focal de vértice posterior de la lente problema o su potencia respectiva:

$$f'_p = \frac{bf'_2}{d} \quad P_p = \frac{d}{bf'_2} \quad [2]$$

Para cada lente se obtiene un valor d distinto que nos permitirá calcular su focal y, en consecuencia, su potencia.

•Ejemplo: supongamos que $f'_2 = 100$ mm, $b = 15$ mm y que $d = 5$ mm aplicando las dos ecuaciones anteriores se obtiene: $f'_p = -300$ mm y $P_p = -3.33$ D

Hasta aquí se ha analizado como el instrumento puede discernir entre una lente problema de potencia positiva o negativa, veamos ahora cual es el proceso que permite hallar el valor de la potencia de vértice posterior de la lente problema.

Principio de medida. Lente esférica

El principio de medida se basa en la deflectometría, es decir en la detección del grado de desviación del haz luz provocado por la lente problema. En un frontofocómetro automático se cumple que esta desviación es mayor cuanto mayor es el valor de la potencia de la lente problema (en valor absoluto), tal como se muestra en la figura 8.

Para calcular la potencia de vértice posterior de la lente problema basta con tener en cuenta que un haz luminoso paralelo al eje óptico procedente del diafragma D_2 después de atravesar la lente problema es desviado un ángulo (α) que a su vez atraviesa la lente L_2 provocando un desplazamiento d en el plano del CCD (fig. 9). Como se conoce el valor de la altura a la que incide dicho haz (b) y la distancia focal de la lente L_2 , se puede hallar el valor de la distancia focal de vértice posterior de la lente problema a partir de las siguientes relaciones trigonométricas:

En la figura 9 se observa que si la lente está centrada, el desplazamiento de la imagen sobre el CCD es el mismo para el haz de luz superior (negro) que para el inferior (azul). Así, la información que realmente utiliza el CCD para determinar la potencia de la lente problema es la distancia entre ambas imágenes, es decir, la distancia $2d$. De esta manera, si la lente problema está descentrada, se puede realizar la lectura de potencia igualmente.

En la figura 10 se muestra la situación cuando una lente positiva está descentrada. En este caso, la distancia de la imagen respecto al centro debida al rayo superior (d_s) es distinta a la distancia de la imagen respecto al centro debida al rayo inferior (d_i). Demostraremos a continuación, que la suma de los valores d_s y d_i es constante sea cual sea el descentramiento de la lente. Para ello veremos que $2d = d_s + d_i$.

Como se conoce la altura a la que incide el rayo superior y el inferior respecto al eje óptico del sistema, esto es: $+b$ y $-b$, y observando la figura 10A, se puede hallar el valor de descentramiento del rayo superior (d_a) a partir de las relaciones trigonométricas

$$\operatorname{tg} \kappa = \frac{x}{f'_p} \quad \operatorname{tg} \kappa = \frac{d_a}{f'_2} \quad [3]$$

Igualando ambas expresiones se obtiene

$$\frac{d_a}{f'_2} = \frac{x}{f'_p} \quad [4]$$

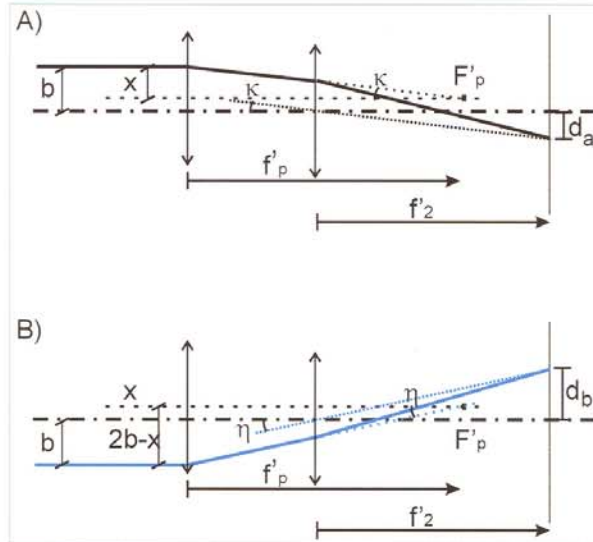


Fig. 10. Esquema de las relaciones trigonométricas necesarias para hallar la potencia de una lente esférica en el caso que no este centrada. A) trazado del haz superior y B) trazado del haz inferior.

siendo ésta expresión idéntica a la ecuación [7] y por consiguiente

$$2d = d_a + d_b$$

Por lo tanto queda demostrado que conociendo la distancia máxima de las imágenes en un meridiano de la CCD, podemos conocer la potencia de la lente en dicho meridiano, independientemente de si la lente problema esta centrada o no.

de donde se puede obtener la relación

$$d_a = \frac{x f'_2}{f'_p} \quad [5]$$

A partir de un razonamiento similar, pero partiendo del rayo inferior, figura 10 B, obtenemos:

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{tg} \eta &= \frac{2b-x}{f'_p} \\ \operatorname{tg} \eta &= \frac{d_b}{f'_2} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{2b-x}{f'_p} = \frac{d_b}{f'_2} \Rightarrow d_b = \frac{f'_2(2b-x)}{f'_p} \quad [6]$$

Sumando d_a y d_b

$$d_a + d_b = \frac{f'_2}{f'_p}(x+b-x) = \frac{f'_2}{f'_p} 2b \quad [7]$$

Anteriormente, con la lente centrada se había hallado la relación [2] con la que se obtiene

$$d = \frac{b f'_2}{f'_p} \Rightarrow 2d = \frac{f'_2}{f'_p} 2b = d_a + d_b \quad [8]$$

Medida de una lente tórica. Determinación del eje de una lente tórica

Hasta este momento se ha supuesto que las lentes problemas sean esféricas, pero ¿qué ocurre si son tóricas? En la figura 11 se muestra que también inciden cuatro haces de luz en el plano del CCD pero en este caso, los cuatro puntos de luz no serán equidistantes del centro, como ocurría en el caso de las lentes esféricas. Esto es debido a la diferencia de potencia entre los meridianos que provoca que la vergencia de los haces de luz sea distinta en cada meridiano. Por lo demás, el principio de medida de la potencia de cada meridiano es el mismo que para lentes esféricas.

Respecto a la determinación del eje debemos tener presente si la lente tórica se sitúa de manera que sus meridianos coinciden a 0° o a 90° , la lectura se efectuará tal y como se ha explicado en el apartado anterior. Pero en general esto no es así ya que al situar la lente problema en el frontofocómetro los meridianos pueden estar orientados en cualquier posición y no tienen porque coincidir con los ejes a 0° o a 90° .

Cuando la lente es esférica, se ha supuesto que el diafragma D_1 gira en sentido horario y se

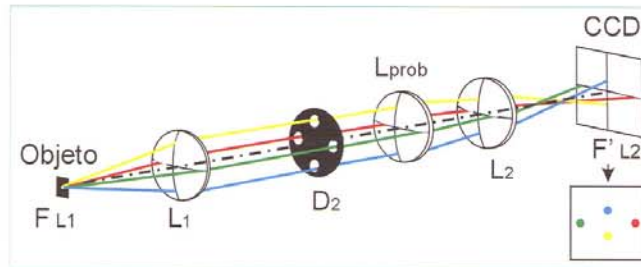


Fig. 11. Distribución de los haces luminosos que llegan sobre el CCD cuando la lente problema es tórica y está orientada a 90° o 0° respecto al eje del instrumento. En este caso, al igual que en las lentes esféricas, el valor de desplazamiento depende de la potencia de la lente en cada meridiano.

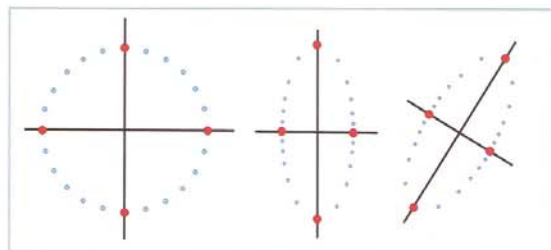


Fig. 12. Figuras que se obtienen sobre el CCD cuando se gira el diafragma D_2 a incrementos de 15° . De izquierda a derecha se muestra el resultado para: una lente esférica, una lente tórica con el eje a 0° y una lente tórica con el eje a 30° .

realizan las lecturas en cuatro posiciones distintas, o sea, cada 90° hasta completar una vuelta entera. Para realizar las medidas de lentes tóricas, el diafragma D_2 también debe girar y para cada posición el diafragma D_1 debe dar una vuelta entera para poder hacer la lectura. Así, para una lente tórica con el eje no coincidente con 0° o 90° , después de que el diafragma D_2 haya efectuado una vuelta completa, las manchas de luz habrán formado una elipse sobre la CCD (fig. 12). Los ejes mayor y menor de la elipse coincidirán con los meridianos principales de la lente y, por lo tanto, se podrá determinar el eje de la lente tórica. Las distancias d_1 y d_2 determinarán la potencia de cada uno de los meridianos.

Conclusiones

Hemos presentado el principio general que rige el funcionamiento de un frontofocómetro automático genérico sin entrar en las particularidades que cada marca y modelo posee.

Se ha visto que un frontofocómetro automático está formado por distintos elementos: ópticos, mecánicos y electrónicos debidamente conjuntados. El principio de medida se basa en la deflectometría, es decir en la medida del grado de desviación que introduce la lente problema a un haz de luz conocido. Gracias a un sensor CCD

y a su capacidad de detectar la posición de los haces de luz que llegan a su superficie se puede hallar tanto el signo como el valor de la potencia de vértice posterior.

Asimismo, se ha visto que un frontofocómetro automático es capaz de medir la potencia de vértice posterior de cualquier lente oftálmica, tanto si es esférica como tórica. Si la lente es tórica, el sistema también proporciona la orientación del eje. La única intervención del usuario en la medida se limita a colocar la lente en la posición correcta.

Las principales ventajas de los frontofocómetros automáticos son su facilidad de uso, su rapidez de lectura y la disminución de errores accidentales en el proceso de medida ya que el resultado obtenido no depende del enfoque manual.

Agradecimientos

A Estixu Olalde por su colaboración en el dibujo de los numerosos esquemas.

Bibliografía

1. Henson DB. Optometric Instrumentation. 2nd edition. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1996.

