



Principales fuentes de error en el uso del frontofocómetro de visión directa

Montserrat Arjona
Núria Tomás
Josep Arasa

Centro de Desarrollo de Sensores, Instrumentación y Sistemas (CD6)
Universitat Politècnica de Catalunya

Gran parte de los instrumentos optométricos son subjetivos o de visión directa, es decir, instrumentos en los que la luz procedente del instrumento es recogida por el ojo del observador¹. En dichos instrumentos, el observador es parte activa del proceso lo que conlleva la necesidad de tomar ciertas precauciones en el momento de su utilización. Esta necesidad proviene del hecho de que cada observador es distinto en cuanto a refracción ocular se refiere y, en consecuencia, el instrumento debe adaptarse a los distintos estados refractivos oculares. Si esto no ocurre, pueden derivarse tres consecuencias: la imagen final obtenida es de mala calidad, la imagen final es de buena calidad pero a costa de que el observador acomode, o finalmente, si se trata de un instrumento de medida, el valor que proporciona el instrumento es erróneo aunque la imagen sea nítida.

En los instrumentos optométricos subjetivos destinados solamente a la observación, como el biomicroscopio ocular, el hecho de que el instrumento no esté adaptado a la ametropía del observador no presenta graves consecuencias para el diagnóstico siempre que la borrosidad no sea excesiva. Si esto sucede, el observador intentará acomodar para compensar la falta de nitidez, claro está que a costa de una fatiga ocular importante. Por el contrario, en los instrumentos optométricos subjetivos diseñados para realizar medidas, como el frontofocómetro o el queratómetro, resulta imprescindible visualizar correctamente el test para

poder obtener una medida correcta. Así pues, el hecho de que el instrumento no compense la ametropía del observador puede tener consecuencias de mayor envergadura, ya que puede conducir a medidas incorrectas.

En este artículo se presentan las principales fuentes de error en el uso de un frontofocómetro de visión directa², haciendo hincapié en el error cometido por un ajuste erróneo del ocular.

Instrumentos optométricos de visión directa: adaptación al observador

Los instrumentos optométricos de visión directa, también conocidos como instrumentos

Correspondencia

Montserrat Arjona
Centro de Desarrollo de Sensores,
Instrumentación y Sistemas (CD6)
Universitat Politècnica de Catalunya
Rambla St Nebridi 10
08222 Terrassa
arjona@oo.upc.es

subjetivos, se caracterizan porque la luz procedente del instrumento es recogida por el ojo del observador. La mayoría de estos instrumentos se basan en dos configuraciones clásicas, la del microscopio y la del anteojo astronómico. La primera configuración se utiliza para la observación de objetos pequeños y cercanos, mientras que la segunda configuración se utiliza para observar objetos lejanos.

Todos los instrumentos optométricos de visión directa, independientemente de su configuración básica, están formados esencialmente por los mismos elementos: un objetivo, un retículo y un ocular, tal como muestra la figura 1. La misión del objetivo es formar una imagen intermedia real del objeto sobre el retículo y la función del ocular es aumentar el tamaño aparente de dicha imagen y formarla en el punto remoto del observador. El comportamiento y estructura de los oculares de ambos instrumentos es muy similar, y por extensión la estructura y funcionamiento de los oculares de los instrumentos de visión directa son muy similares entre sí.

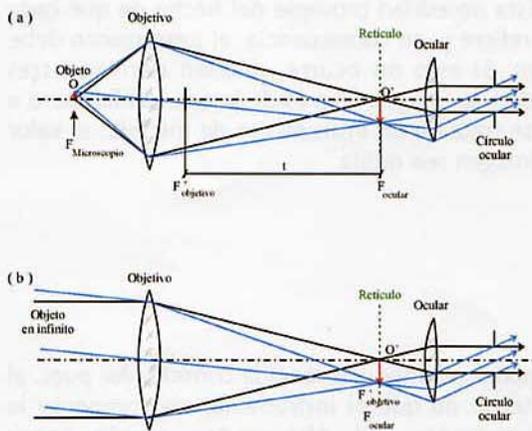


Fig. 1. Representación esquemática de instrumentos ópticos básicos utilizados por un observador emétrope: a) microscopio b) anteojo astronómico. En ambos casos la imagen intermedia O' se forma sobre el retículo.

Para conseguir que la imagen observada sea nítida, y sin acomodar el observador, la primera operación que se debe efectuar es la "puesta en estación" del ocular, esto es, ajustar el ocular a la ametropía del observador. Esta operación debe realizarse sin objeto, así la única imagen que se observará será la imagen del propio retículo a través del ocular. Para realizar correctamente esta operación, el observador debe situar el ocular lo más alejado posible del retículo obteniendo

una imagen borrosa del mismo. Esta operación se consigue desplazando el ocular hacia fuera del instrumento y recibe el nombre de "sacar el ocular". Una vez se ha sacado el ocular, éste debe desplazarse hacia el objetivo hasta hallar la primera posición en la que el retículo se ve nítido. Cuando se alcanza esta posición, el ocular está en estación. Es muy importante no sobrepasar el primer punto donde la imagen del retículo se ve nítida. Si se sobrepasa este punto, la imagen que proporciona el ocular está dentro del recorrido de acomodación por lo que la imagen sigue siendo nítida pero el observador estará acomodando. Una vez puesto en estación el ocular ya se puede proceder a enfocar el objeto, esto sí, sin cambiar nunca la distancia objetivo-ocular.

Si el observador es emétrope el retículo quedará situado en el plano focal objeto del ocular, de manera que su imagen a través de éste se formará en el infinito que es donde se halla su punto remoto (fig. 2a). Si el observador es amétrope (miope o hipermétrope), el retículo quedará situado por delante (si es hipermétrope) o por detrás (si es miope) del plano focal objeto del ocular (figs. 2b y 2c). Así, un observador hipermétrope debe situar el ocular más alejado del objetivo de lo que lo haría un observador emétrope mientras que un observador miope debe situarlo más cerca del objetivo de lo que lo situaría un observador emétrope. En todos los casos se consigue que la imagen del retículo a través del ocular se forme en el punto remoto del observador, consiguiendo una visión nítida y evitando la acomodación.

En la práctica esta tarea solamente es posible si la ametropía del observador está comprendida en el intervalo de desplazamiento que, por construcción, pueden realizar los oculares de los instrumentos comerciales. Normalmente, los oculares llevan grabada la escala en dioptrías del recorrido que pueden realizar con una marca central más visible que indica la posición cero del ocular adaptado al observador emétrope.

Otra consideración ligada al ocular, que debe tenerse en cuenta para una buena utilización del instrumento, es la posición del observador respecto al círculo ocular. El círculo ocular (CO) es la imagen del diafragma de apertura (DA) del instrumento a través de todos los elementos ópticos del mismo. Generalmente el círculo ocular es real y está situado a unos pocos milímetros del ocular (emergencia de pupila) con el fin de que el observador pueda situar su ojo cómodamente. Para que el acoplamiento



observador-instrumento sea correcto, el observador debe situarse en el círculo ocular del instrumento ya que de lo contrario tanto el campo observado como la cantidad de luz recibida por el ojo se verán afectados.

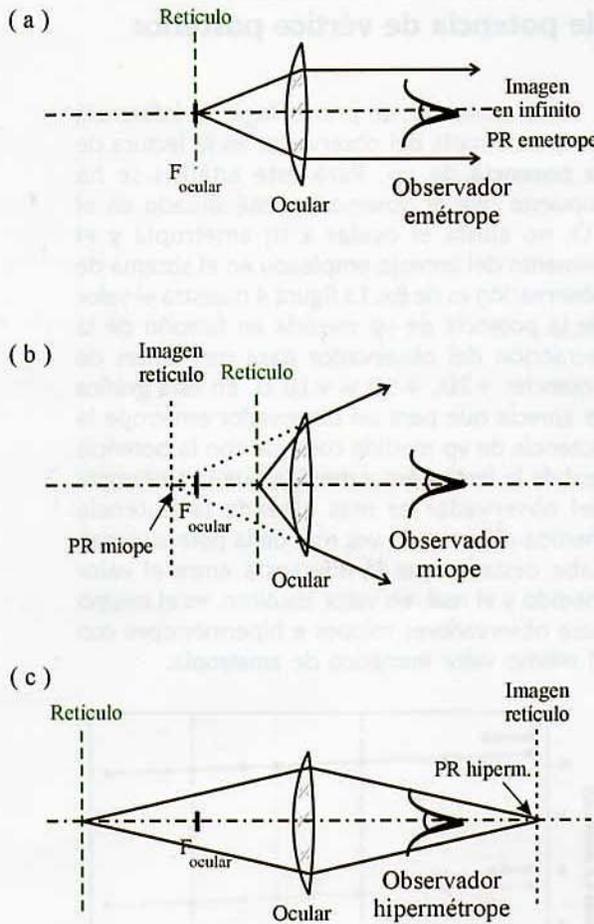


Fig. 2. Posición del retículo respecto al plano focal objeto del ocular según la ametropía del observador. a) Para un observador emétrope. b) Para un observador miope. c) Para un observador hipermetrope.

Un caso bastante habitual es el de los observadores que utilizan gafas. Si la ametropía del observador es fundamentalmente esférica (miopía o hipermetropía pura, sin presencia de astigmatismo) la mejor solución es que realice la observación sin gafas y ponga en estación el ocular. Si la ametropía tiene una componente elevada de astigmatismo, el observador sólo obtendrá una buena compensación con el uso de sus gafas por lo que no puede quitárselas aunque las gafas le impedirán situar el ojo sobre

el círculo ocular, con los problemas que ello acarrea. Para solucionar este inconveniente muchos instrumentos ya tienen una emergencia de pupila suficientemente grande.

El frontofocómetro de visión directa: fuentes de error

El frontofocómetro es un instrumento optométrico diseñado para realizar la medida de la potencia de vértice posterior (vp) de las lentes oftálmicas. Los frontofocómetros de observación directa se pueden dividir en dos partes que desempeñan distintas funciones: el sistema de medida y el sistema de observación (fig. 3).

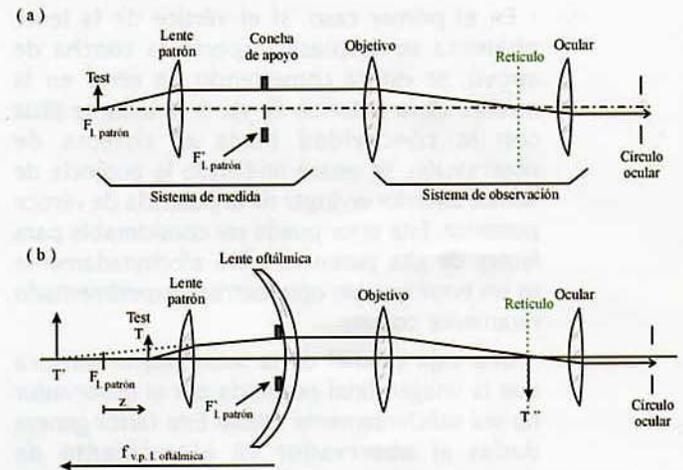


Fig. 3. Esquema de un frontofocómetro de visión directa. a) Sin presencia de la lente oftálmica. b) Con la lente oftálmica presente y el test enfocado.

El sistema de medida está compuesto por un test y una lente patrón dispuestos de tal forma que en un principio, antes de situar la lente oftálmica, la lente patrón proporciona una imagen del test en el infinito. Esto ocurre debido a que el test está situado en el plano focal objeto de la lente patrón (fig. 3a) y, por consiguiente, el sistema de observación, constituido por un anteojo astronómico, recibe la luz procedente del infinito, condición óptima para ver nítida la imagen. Al situar la lente oftálmica sobre la concha de apoyo (fig. 3b), el test debe desplazarse hasta que su imagen a través de la lente patrón se sitúe en el plano focal objeto de la lente oftálmica. De esta forma, su imagen a

través de la lente oftálmica continua formándose en el infinito y por lo tanto sigue viéndose nítida a través del sistema de observación. En esta situación se está en condiciones de obtener el valor de la potencia de vp de la lente oftálmica ya que el desplazamiento del test (z) nos permite hallarla a través de la relación: $P_{vp} = 1 / f'_{vp} = z / f_{patron}^2$

Debemos tener presente que la lectura de la potencia de vp a través de un frontofocómetro de observación directa se ve afectada por varios factores, como son la lente oftálmica mal situada en la concha de apoyo, la calidad óptica de la lente patrón, el filtro utilizado en el sistema de iluminación, la compensación o no de la ametropía del observador, el aumento del antejo que lleva asociado el instrumento y, por último, la correcta situación del ojo del observador³.

En el primer caso, si el vértice de la lente oftálmica se desplaza respecto la concha de apoyo, se estará cometiendo un error en la medida de la potencia de vp. Si la lente se sitúa con la concavidad hacia el sistema de observación, se estará midiendo la potencia de vértice anterior en lugar de la potencia de vértice posterior. Este error puede ser considerable para lentes de alta potencia, pero afortunadamente es un error que un optometrista experimentado raramente comete.

Una baja calidad de la lente patrón provoca que la imagen final percibida por el observador no sea suficientemente nítida. Este factor genera dudas al observador en el momento de determinar si el test está nítidamente enfocado y en consecuencia puede inducir a error. Este factor, si el frontofocómetro es de calidad, debería ser irrelevante.

Un efecto similar al anterior se produce si el filtro del sistema de iluminación no tiene la transmitancia espectral correcta, pero la corrección de este efecto esta fuera del alcance del observador, sólo el fabricante del instrumento puede garantizar el uso del filtro correcto.

Si se utiliza inadecuadamente el frontofocómetro, debido a que el ocular no está "puesto en estación", la lectura proporcionada por el frontofocómetro será incorrecta porque el observador desplazará el test hasta verlo nítido pero su imagen a través de la lente patrón ya no se formará en el plano focal objeto de la lente oftálmica. Dado que ésta es la principal fuente de error que puede controlar el optometrista, en los siguientes apartados analizaremos su repercusión a la vez que veremos la influencia

del aumento del antejo que lleve asociado el instrumento y la correcta situación del ojo del observador respecto al CO.

Influencia de la ametropía del observador en la lectura de potencia de vértice posterior

Se ha analizado, en primer lugar, la influencia de la ametropía del observador en la lectura de la potencia de vp. Para este análisis se ha supuesto que el observador esté situado en el CO, no ajusta el ocular a su ametropía y el aumento del antejo empleado en el sistema de observación es de 6x. La figura 4 muestra el valor de la potencia de vp medida en función de la refracción del observador para tres lentes de potencia: +2D, +5D y +10 D. En esta gráfica se aprecia que para un observador emétrope la potencia de vp medida coincide con la potencia real de la lente pero a medida que la ametropía del observador es mas elevada la potencia medida difiere cada vez mas de la potencia real. Cabe destacar que la diferencia entre el valor medido y el real, en valor absoluto, es el mismo para observadores miopes e hipermétropes con el mismo valor numérico de ametropía.

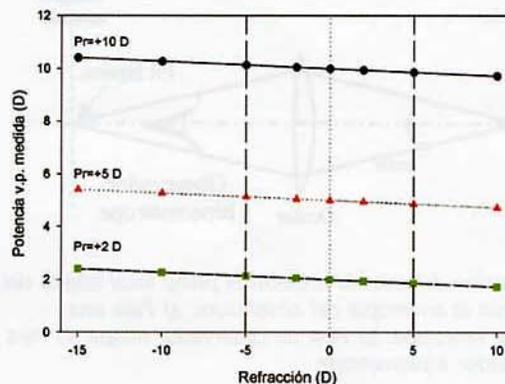


Fig. 4. Representación del valor de la potencia de vértice posterior medida en función de la refracción del observador para tres lentes con potencias de +2D, +5 D y +10 D.

En esta gráfica también se aprecia que fijado el valor de la ametropía de un observador, la diferencia entre el valor medido y el real es constante e independiente de la potencia de vp de la lente oftálmica. Así pues, para un observador miope de -5 D esta diferencia es siempre de 0,14 D y en cambio para un miope

de -2 D es siempre de 0,06 D, para cualquier potencia de la lente oftálmica.

Teniendo en cuenta que el valor estándar de la resolución del instrumento o intervalo de lectura de un frontofocómetro de visión directa es de 0,125 D para potencias comprendidas entre ± 3 D y de 0,25 D para el resto de los valores, vemos que es la ametropía del paciente la que determina si el error de lectura cometido supera o no dicho intervalo. Así pues, siguiendo el ejemplo anterior, un observador miope de -5 D cometerá un error de lectura, debido a su ametropía, superior al valor estándar si la potencia de la lente esté comprendida entre ± 3 D, en cambio para el resto de lentes, el error de lectura debido a su ametropía siempre será inferior al valor estándar. Si el observador es un miope de -2D, el error de lectura debido a su ametropía nunca será superior a los intervalos estándar, independientemente del valor de la potencia de la lente.

Para simplificar la gráfica, sólo se han representado los resultados para tres lentes oftálmicas de potencia positiva. Empleando lentes negativas de la misma potencia, se obtienen las mismas diferencias de potencias aunque con lentes positivas se incrementa el valor de potencia de vp leído mientras que con lentes negativas disminuye. Es decir, para una lente oftálmica de +10 D un observador miope de -8 D leería 10,22 D (diferencia de 0,22 D) en cambio el mismo observador con otra lente oftálmica de -10 D leería -9,78 D (diferencia de 0,22 D).

Dado que los frontofocómetros de visión directa permiten ajustar el ocular a la ametropía del observador, en esta primera gráfica se han representado las dos líneas verticales a los valores de refracción de ± 5 D, correspondientes a los valores más usuales de ajuste. Así pues, para un observador con ametropía esférica comprendida entre dichos valores el error de lectura debido a su ametropía se puede eliminar ajustando convenientemente el ocular. En cambio un observador con ametropía esférica superior a ± 5 D siempre efectuará un error en la lectura aunque éste se puede minimizar ajustando el ocular en la máxima posición de +5 D si es hipermetrope o de -5 D si se trata de un miope. Como ejemplo pongamos un miope de -10 D con una lente oftálmica +5 D. Si el observador no ajusta el ocular leerá una potencia de +5,28 D (cometiendo un error de 0,28 D) en cambio si lo ajusta a -5 D le quedara una ametropía residual de -5 D con la que leerá una potencia de +5,14

D (error de 0,14 D). Con estos resultados queda de manifiesto que para el primer caso del ejemplo el valor de la diferencia supera el valor estándar aceptado de 0,25 D y en cambio en el segundo caso no lo supera.

Con el fin de evaluar un poco más la repercusión que tiene la no-compensación de la ametropía del observador, en la figura 5 se ha representado el error relativo en la lectura frente a la refracción para varias lentes con potencias de ± 2 D, ± 5 D y ± 10 D. Las condiciones son las mismas que en la figura anterior y también se han representado las dos líneas verticales a refracción ± 5 D correspondientes a los valores usuales de ajuste del ocular.

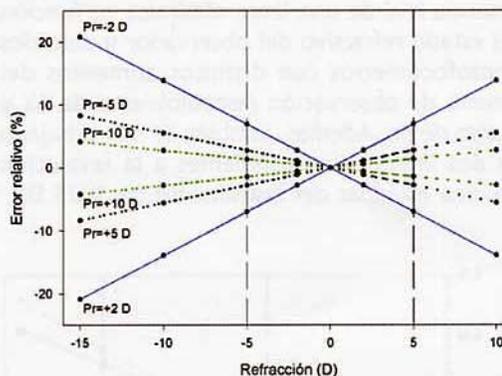


Fig. 5. Representación del error relativo en la lectura frente a la refracción del observador para varias lentes de ± 2 D, ± 5 D y ± 10 D.

En esta gráfica se pone de manifiesto que el error relativo aumenta con la refracción, siendo el error relativo bajo para las diferentes potencias de lentes oftálmicas si el valor de la ametropía también lo es. Cuando el valor de la ametropía crece el error en la lectura aumenta considerablemente para lentes con potencias bajas. Este error casi alcanza el 21 % para observadores con una ametropía de -15 D si la lente oftálmica es de -2 D. Este resultado es completamente lógico si se tiene en cuenta los resultados de la figura 4. En ella se observa que para un mismo observador la diferencia entre la potencia leída y la real es constante, dependiendo única y exclusivamente de la ametropía del observador. Así pues, para una misma diferencia de potencias, su peso es mayor si la potencia de la lente es menor y viceversa. Sirve como ejemplo el caso de un observador con un estado refractivo de -5 D, para el cual se ha visto que el error de lectura que comete es de 0,14D, si la lente



oftálmica es de -10 D el error relativo es del 1,4% mientras que si la lente es de -2 D el error relativo aumenta hasta el 7%.

Influencia del aumento del sistema de observación

El segundo factor analizado es la influencia del aumento del sistema de observación que lleva asociado el frontofocómetro. En este caso también se ha supuesto que el observador está situado en el CO y que no ajusta el ocular a su ametropía. En la figura 6 se ha representado la diferencia entre la potencia de vp medida y la potencia real de una lente oftálmica en función del estado refractivo del observador y para dos frontofocómetros con distintos aumentos del sistema de observación (anteojo): uno de 5x y el otro de 6x. Además, también se han dibujado las dos líneas correspondientes a la resolución máxima estándar del instrumento ($\pm 0,25$ D).

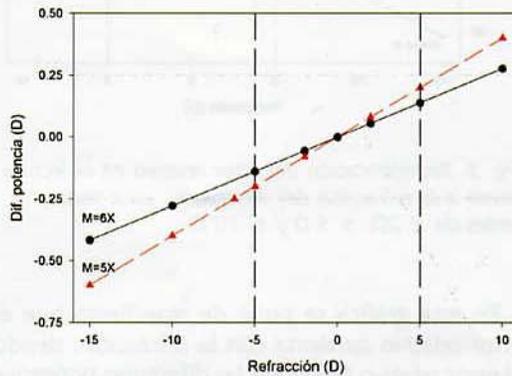


Fig. 6. Representación de la diferencia de potencia de vértice posterior medida y la real de una lente oftálmica en función del estado refractivo del observador para dos frontofocómetros con sistemas de observación distintos, 5x y 6x.

Al analizar la gráfica se ve claramente la influencia del aumento del sistema de observación, basta con fijarnos que para el anteojo de 6x estos límites se superan para observadores con una ametropía mayor de ± 9 D mientras que si el anteojo es de 5x estos límites ya se consiguen con solo ametropías de $\pm 6,25$ D. Se puede concluir que el sistema de observación que lleva incorporado el frontofocómetro de visión directa influye claramente en la precisión de la medida. Así pues,

utilizando un anteojo de mayor aumento se puede conseguir que el error de lectura cometido por observadores con ametropías elevadas quede dentro del intervalo estándar o bien sea mucho menor.

Influencia de la posición del observador

El último factor analizado corresponde a la influencia de la posición del ojo del observador respecto al CO. En la figura 7 se evalúa dicha influencia considerando, además, que las lecturas se han realizado con dos frontofocómetros formados por los mismos anteojos que en la gráfica anterior.

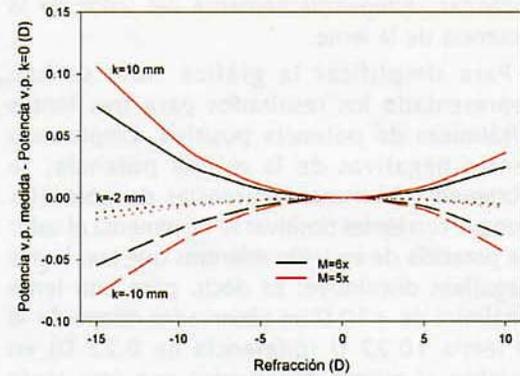


Fig. 7. Representación de la diferencia entre la potencia de vértice posterior medida por un observador desplazado del círculo ocular ($k = -10$ mm, $k = -2$ mm y $k = 10$ mm) y la potencia de vp medida cuando está situado en él ($k = 0$) frente a la refracción y para dos frontofocómetros con sistemas de observación distintos, 5x y 6x.

En la figura 7 se ha representado la diferencia entre la potencia de vp medida por un observador desplazado una distancia k respecto al círculo ocular y la potencia de vp medida cuando el observador está situado en él ($k=0$) en función de la refracción y para dos anteojos distintos. De la gráfica se desprende que el error en la potencia de vp medida aumenta cuando lo hace el valor de k (ambas en valor absoluto), poniéndose de manifiesto que este aumento es aún mayor si el anteojo es de menor aumento. Además, se ve claramente que la diferencia de potencias no es la misma si el observador se acerca o se aleja del ocular aunque el valor del desplazamiento sea el

mismo. Como ejemplo pongamos el caso de un observador de -10 D utilizando un frontofocómetro con un antejo asociado de $M=5x$, si $k=-10$ mm la diferencia entre la potencia medida para dicha posición y la medida en $k=0$ es de -0,036 D mientras que si $k=+10$ mm la diferencia resulta de 0,044 D. Los resultados también muestran que, para el mismo antejo y un mismo valor de k (p.ej., -10 mm), dos observadores, uno miope y el otro hipermetrope con igual valor numérico de refracción (p.ej., ± 10 D), la diferencia de potencias no coincide (para el miope es de -0,036 D y para el hipermetrope es de -0,044 D).

No obstante, los valores de las diferencias de potencia analizados son relativamente pequeños poniendo de manifiesto que si bien es importante una correcta colocación del ojo en el CO, con el fin de tener tanto el máximo campo como la máxima cantidad de luz, no es especialmente relevante en el valor de potencia medida.

Conclusiones

Las conclusiones más relevantes respecto a las principales fuentes de error en el uso del frontofocómetro de visión directa son:

- La ametropía del observador influye en la medida final si el ocular del frontofocómetro no está correctamente ajustado.
- La diferencia entre la potencia de v_p medida y la potencia real es un valor que depende

únicamente del valor de la ametropía del observador. Por consiguiente, el error absoluto en la lectura de la potencia de v_p es constante para un observador amétrope, independientemente de la potencia de la lente. Consecuentemente el error relativo es mayor para las lentes de menor potencia.

- A pesar de que el error cometido es aceptable si es menor que el intervalo estándar, es siempre recomendable ajustar el ocular para evitarla. Los errores cometidos por observadores con ametropías comprendidas entre $\pm 5D$ pueden anularse poniendo en estación el ocular, y para ametropías superiores se puede disminuir el error ajustando el ocular al máximo valor posible.

- El aumento del sistema de observación (antejo) influye en el error de lectura cometido. Dicho error disminuye a medida que el aumento del antejo aumenta llegando a alcanzar, para algunas ametropías, valores iguales o inferiores a los del intervalo estándar.

- La colocación del observador fuera del CO provoca un error irrelevante en la lectura de potencias.

Bibliografía

1. Antó J, Tomás N. Óptica Instrumental. Barcelona, Edicions UPC, 1996
2. Martínez M, Furlan WD, Pons A, Saavedra G. Instrumentos Ópticos y Optométricos. Teoría y prácticas. Universitat de Valencia, 1998.
3. Henson DB. Optometric Instrumentation. 2nd edition. Oxford, Butterworth-Heinemann, 1996.

Josep Arasa y Montserrat Arjona, Doctores en Ciencias Físicas, y Núria Tomàs, Diplomada en Óptica y Máster en Óptica Aplicada, pertenecen al Departamento de Óptica y Optometría de la Universidad Politécnica de Catalunya.

En la actualidad su actividad investigadora se desarrolla en el Centre de Desenvolupament de Sensors, Instrumentació i Sistemes (CD6) e imparten docencia en la Escola Universitària d'Òptica i Optometria de Terrassa (EUOOT) y en el programa de doctorado de Ingeniería Óptica. Su investigación siempre se ha realizado en el campo de la Óptica y fundamentalmente en las vertientes de Ingeniería Óptica y Óptica visual, reflejo de dicha actividad son los diversos artículos publicados en revistas internacionales y las patentes concedidas.

Respecto a la docencia desempeñada en la EUOOT, cabe destacar que en la última década se ha centrado principalmente en las asignaturas de Óptica Instrumental (Plan 82) y de Instrumentos optométricos (Plan 92), llevando a cabo la tarea de coordinación.

También han publicado artículos y libros relacionados con la docencia ("Óptica Instrumental" y "Instrumentos ópticos y optométricos. Problemas", ambos de Ediciones UPC). Josep Arasa y Montserrat Arjona imparten en el programa de doctorado, entre otras, las asignaturas de Diseño de sistemas ópticos e Instrumentación óptica avanzada, respectivamente.