



Biomicroscopio ocular con lámpara de hendidura Sistema de observación

Montserrat Arjona, Núria Tomás, Josep Arasa
Centro de Desarrollo de Sensores, Instrumentación y Sistemas
(CD6)

El biomicroscopio ocular con lámpara de hendidura es un instrumento construido para examinar el segmento anterior del ojo y sus anexos. Una de sus aplicaciones en Optometría es en el campo de la contactología, ya que permite realizar un examen meticuloso de las estructuras oculares tanto en el momento de prescribir y adaptar lentes de contacto como en los controles posteriores. Consta de dos partes claramente diferenciadas: el sistema de observación del ojo del paciente y el sistema de iluminación con el que se ilumina adecuadamente la parte observada. Debido a la complejidad del instrumento, en este artículo nos centraremos exclusivamente en el sistema de observación. Describiremos los elementos ópticos que lo componen, analizaremos los diferentes diseños ópticos presentes en el mercado y evaluaremos sus prestaciones. Por último, examinaremos los datos técnicos que proporcionan los fabricantes y los utilizaremos para determinar los parámetros clave del instrumento y la información relevante.

Introducción

El biomicroscopio ocular con lámpara de hendidura es uno de los instrumentos más

utilizados en los gabinetes de contactología ya que permite examinar las estructuras oculares durante el proceso de adaptación de lentes de contacto (córnea, conjuntiva, párpados, etc.) y en controles posteriores.

Todo usuario de este instrumento es consciente de su complejidad. Consta de dos partes claramente diferenciadas, un sistema de observación del ojo del paciente, basado en un microscopio estereoscópico, y un sistema de iluminación que proyecta una hendidura sobre el ojo a examinar, de ahí el nombre de lámpara de hendidura. Ambas partes están unidas a través de un eje mecánico común que les permite girar libremente entorno a él con la ventaja de que la zona iluminada siempre coincide con la zona observada.

En este artículo nos centraremos exclusivamente en el sistema de observación. Primero haremos una breve revisión histórica, después describiremos las distintas clases de sistemas de observación y las relacionaremos con los datos técnicos que proporcionan los fabricantes. Todo ello encaminado a ayudar al lector a comprender y valorar los distintos modelos que ofrece el mercado.

Historia de la lámpara de hendidura

Alvar Gullstrand recibió el premio Nóbel de Medicina y Fisiología en el año 1911 por su contribución en el estudio de los dioptrios oculares y por el desarrollo de un nuevo instrumento denominado microscopio de lámpara de hendidura que le permitió la exploración del ojo. Los instrumentos actuales no difieren mucho de los primeros diseños aunque presentan una considerable mejora que los hacen

Correspondencia

Montserrat Arjona
Centro de Desarrollo de Sensores, Instrumentación
y Sistemas (CD6)
Universitat Politècnica de Catalunya
Rambla St Nebridi 11
08222 Terrassa
arjona@oo.upc.edu



más prácticos y manejables a la vez que permiten una mejor visualización de los medios oculares.

Destaca la variedad de nombres que recibe este instrumento: biomicroscopio ocular, microscopio de lámpara de hendidura, lámpara de Gullstrand y lámpara de hendidura. Quizás, los nombres más utilizados son biomicroscopio y lámpara de hendidura, aunque el nombre más adecuado, desde el punto de vista constructivo, sea el de microscopio de lámpara de hendidura porque refleja mejor como está construido.

Composición óptica básica del sistema de observación del biomicroscopio

El instrumento básico en que se fundamenta el sistema de observación del biomicroscopio es un microscopio (fig. 1a), compuesto por un objetivo y un ocular, aunque además lleva incorporado un sistema inversor de la imagen constituido por prismas (fig. 1b). El microscopio permite observar las imágenes aumentadas aunque proporcionan la imagen invertida. Este hecho no representa ningún inconveniente en microscopía tradicional, bien sea porque no importa la orientación de la imagen de la muestra observada, bien sea porque se coloca la muestra invertida y así su imagen se ve derecha. En cambio, cuando se observa el ojo de un paciente con un biomicroscopio resulta imprescindible ver la imagen derecha y, evidentemente, no podemos aplicar la solución del microscopio.

Para solucionar este inconveniente, en el sistema de observación del biomicroscopio se incluye un sistema inversor formado por prismas de Porro de primera especie que además presentan dos ventajas adicionales: reducen la longitud del sistema de observación gracias al "plegado" del camino óptico y permiten adaptar el instrumento a la distancia interpupilar del observador.

Otra característica fundamental del instrumento es que el sistema de observación es binocular. Es decir, en realidad son dos sistemas acoplados, uno para cada ojo, que permiten aprovechar las ventajas de la visión estereoscópica.

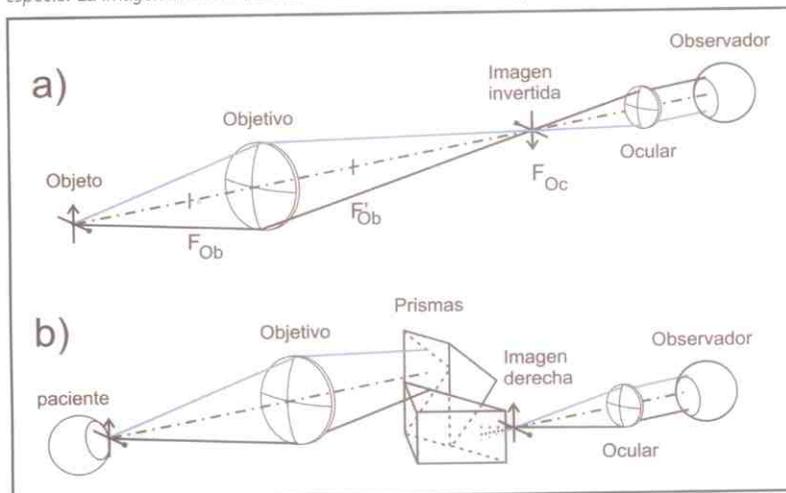
Aumento del sistema de observación del biomicroscopio

Los biomicroscopios comerciales proporcionan distintos valores de aumento, por consiguiente permiten variar el tamaño de la imagen observada a conveniencia del usuario y, en consecuencia, variar la extensión de la zona explorada (campo).

El valor del aumento del sistema de observación del biomicroscopio básico se obtiene, al igual que en el microscopio, multiplicando el valor del aumento lateral del objetivo (m_{ob}) por el valor del aumento visual del ocular (M_{oc}):

$$M = m_{ob} M_{oc} \quad [1]$$

Fig. 1. a) Esquema básico de un microscopio. b) Esquema básico del sistema de observación de un biomicroscopio con sistema inversor de imagen formado por prismas de Porro de primera especie. La imagen intermedia se forma derecha en el foco objeto del ocular del sistema.



Nótese que en esta expresión no aparece ningún término relacionado con los prismas inversores ya que éstos únicamente invierten la imagen y no afectan al valor del aumento.

Los modelos de biomicroscopios más sencillos, llevan incorporados dos objetivos y el intercambio de aumento se realiza sustituyendo un objetivo por el otro accionando una palanca. El proceso resulta cómodo, tanto para el paciente como para el observador, aunque sólo se consiguen dos valores de aumento según se desprende



de la ecuación [1]. También se puede cambiar el ocular, pasando de dos valores de aumento a cuatro, sin embargo este cambio no es tan cómodo como el anterior. Los valores más corrientes de aumento para el objetivo son de 1x y 1.6x y el valor más habitual de aumento para el ocular es de 10x. Las combinaciones de ambos elementos proporcionan dos valores de aumento total según la ecuación [1]: 10x y 16x. Si sustituimos el ocular por otro de 15x aumentos dispondremos de otros dos valores más de aumento total: 15x y 24x.

Existen en el mercado biomicroscopios con objetivos de distancia focal variable (zoom) que permiten variar de forma continua el aumento del objetivo. Los valores más comunes de aumento de estos objetivos varían entre 0.5x y 2.14x. Si se dispone de un ocular estándar de 15x, tendremos un aumento total variable de forma continua desde 7.5x hasta 32.1x. Evidentemente, si intercambiamos el ocular ampliamos aún más las prestaciones del instrumento.

¿Todos los biomicroscopios llevan el mismo tipo de sistema de observación?

Basta con fijarse en el sistema de observación de varios biomicroscopios para percatarse que existen distintos modelos según el sistema intercambiador de aumentos que lleve asociado. Hasta este momento hemos analizado dos estrategias distintas para obtener diferentes valores de aumento basadas en el intercambio del objetivo y/o del ocular. En cualquier caso, ambos sistemas son constructivamente iguales ya que se basan en el microscopio tradicional (fig. 1).

Existe otro tipo de biomicroscopio en el mercado cuyo sistema de observación lleva incorporado un sistema intercambiador de aumentos constituido por uno o dos anteojos de Galileo situado entre el objetivo y el ocular del biomicroscopio (fig. 2). Este instrumento es constructivamente distinto al descrito antes, puesto que la incorporación del antejo lleva implícita una serie de modificaciones que afectan tanto al número de elementos ópticos implicados como a la disposición de los mismos. En la figura 2 por comodidad se ha prescindido de los prismas inversores aunque en realidad los llevan.

La inclusión del antejo de Galileo (fig. 3) implica la modificación de la función del objetivo ya que el antejo necesita que la luz le llegue paralela y, por tanto, obliga a que la luz salga paralela del objetivo del biomicroscopio. Por esta

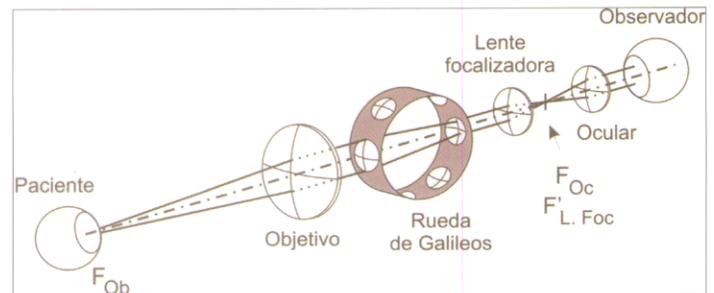


Fig. 2. Esquema básico del sistema de observación de un biomicroscopio con un sistema intercambiador de aumentos formado por una rueda de antejo de Galileo. Por comodidad se ha omitido el sistema inversor de imagen (prismas).

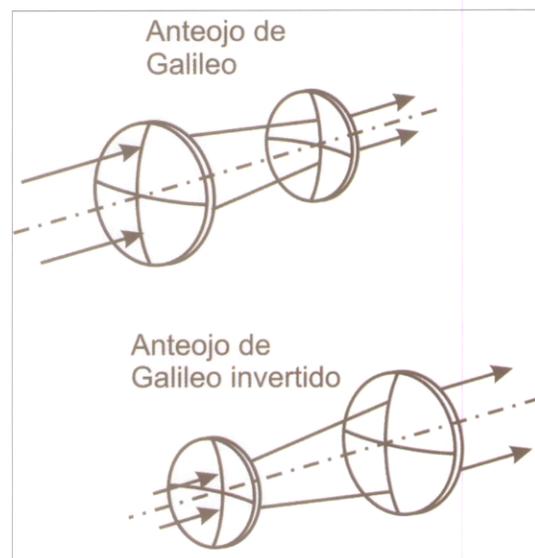


Fig. 3. Esquema de un antejo de Galileo, el cual requiere que el haz de luz sea paralelo tanto en la entrada como en la salida.

razón, el objeto (ojo del paciente) debe situarse en el plano focal objeto del objetivo. A su vez, a la salida del antejo la luz vuelve a salir paralela y, por consiguiente, es necesario situar una lente focalizadora cuya finalidad es formar una imagen intermedia sobre el plano focal objeto del ocular para conseguir que un observador emétrepe vea sin acomodar.

El valor de aumento del instrumento se ve afectado por la contribución de los distintos elementos ópticos que lo constituyen y viene dado por la siguiente relación:

$$M = \left[\frac{f'_{l.foc}}{f'_{ob}} M_{oc} \right] M_{Galileo} = M_{base} M_{Galileo} \quad [2]$$

Donde $f'_{l.foc}$ y f'_{ob} son las distancias focales de la lente focalizadora y del objetivo del biomicroscopio. M_{oc} y $M_{Galileo}$ son los aumentos



visuales del ocular del biomicroscopio y del anteojo de Galileo.

El anteojo de Galileo se sitúa en una rueda (fig. 4), de esta forma el intercambio de aumento se produce al girar la rueda. Según la posición que adopte la rueda se obtienen tres configuraciones distintas y por tanto se logran tres valores de aumento total según sea la posición del anteojo: con anteojo derecho, con anteojo invertido y sin anteojo.

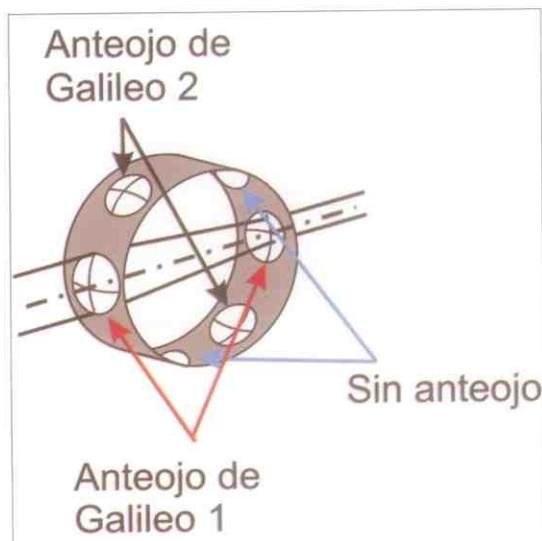


Fig. 4. Disposición de los anteojos de Galileo en la rueda

Pongamos un ejemplo. Sea un biomicroscopio con un anteojo de Galileo 1.6x y con un aumento base de 16x. Según sea derecha o invertida la disposición del anteojo el aumento total será de 25x ($16 \times 1,6$) o de 10x ($16 \times 1/1,6$). Así pues, los tres valores posibles de aumento para este biomicroscopio son: 10x, 16x y 25 x.

Si el sistema lleva otro anteojo de Galileo se podrán obtener dos configuraciones más, es decir se conseguirán un total de cinco valores de aumento posibles, que corresponden a las siguientes configuraciones: con el primer anteojo derecho, con el segundo anteojo derecho, con el primer anteojo invertido, con el segundo anteojo invertido y sin anteojo. Ejemplo: supongamos que el instrumento del ejemplo anterior lleva incorporado otro anteojo 2x, como su aumento base es de 16x significa que según la disposición del segundo anteojo, derecha o invertida, se obtienen otros dos valores de aumento: 32x y 8x. Por consiguiente, dispondremos de un total de cinco aumentos: 8x, 10x, 16x, 25 x y 32x.

En ocasiones, el valor del aumento del anteojo no se da explícitamente, en cambio el valor proporcionado es el del ocular, por consiguiente resulta más práctico expresar la ecuación [2] como

$$M = \left[\frac{f'_{1, \text{oc}}}{f'_{\text{ob}}} M_{\text{Galileo}} \right] M_{\text{oc}} = M_{\text{ob+Galileo}} M_{\text{oc}} \quad [3]$$

Información práctica extraída de los catálogos comerciales

Generalmente los catálogos de biomicroscopios incluyen varias especificaciones del instrumento, entre los cuales siempre se hallan las del sistema de iluminación y las del sistema de observación.

En la tabla I se muestra la información del sistema de observación de diversos biomicroscopios obtenida a partir de sus catálogos comerciales. En dicha tabla se ha respetado la transcripción literal del catálogo. Con sólo mirar las distintas columnas se aprecia que la información dada por los fabricantes es muy diversa, incluso en algunos casos no corresponden a los mismos conceptos. Unos dan unas especificaciones muy completas, en cambio, otros sólo proporcionan unos pocos datos. No obstante, un buen conocimiento del diseño del instrumento nos permite comprender y extraer toda la información relevante, detectar posibles errores, omisiones o aproximaciones en las especificaciones y orientarnos en la elección del instrumento.

Al observar los datos de la tabla I, apreciamos que los ejemplos 1, 2 y 3 nos proporcionan una información bastante completa del sistema de observación del biomicroscopio en comparación con el ejemplo 4. Hemos elegido estos cuatro ejemplos por ser una muestra representativa de los diversos tipos de sistema de observación del biomicroscopio. En el primer ejemplo el sistema de intercambio de aumentos se efectúa cambiando el objetivo 1x por el 1.6x (atención, no es de 16x como indica el catálogo). En el segundo el cambio de aumentos se efectúa variando la distancia focal del objetivo ya que es un zoom y en los dos últimos casos el objetivo es fijo pero lleva incorporado uno o dos anteojos de Galileo (ejemplos 3 y 4, respectivamente).

Respecto a los datos proporcionados de manera directa, aunque sean completos, siempre conviene comprobarlos ya que en muchas ocasiones suelen haber errores, omisiones o aproximaciones. Efectivamente, ya hemos comentado que en el primer modelo hay un



Tabla I. Transcripción literal de los datos de los sistemas de observación de cuatro modelos de biomicroscopio obtenidos a partir de catálogos comerciales

Microscopio	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
Tipo:	Microscopio	Visión binoculares estereoscópico	Binocular tipo Galileo estereomicroscópica	—
Cambio de aumentos:	Sistema giratorio	—	tambor rotatorio de tres pasos	6.3x, 10x, 16x, 25x, 40x
Objetivo:	1x y 16x	De 0.5x a 2.14x	0.75x, 1.2x, 1.85x	—
Ocular:	10x – 16x	15x (estándar); 10x, 20x 33x (opcional)	13.5x	12.5x
Aumento de observación	—	De 7.5x a 32.1x estándar (relación zoom 4.3x)	—	—
Aumento total:	10x – 25.6x	5x - 71x con oculares opcionales	10x, 16x, 25x	—
Campo de visión:	—	—	8 mm -21,5 mm	—
Distancia pupilar:	55 mm – 82 mm	55 mm – 73 mm	43 mm -80 mm	52 - 78 mm
Ajuste dióptrico:	+/- 8 D para ocular 10x +/-10 D para ocular 16x	-8 D a +6 D	-5 D a +5 D	+ 8 a -8 D

error en el aumento del objetivo, el catálogo indica 16x. Este valor es excesivo y, además, combinado con los valores de aumentos del ocular (10x o 16x) nunca podría dar el resultado de 25.6x de aumento total. En cambio, si el aumento es de 1.6x si que se obtiene el aumento total indicado.

Otro punto a tener en cuenta son las aproximaciones que se efectúan al proporcionar el valor de aumento total. En la mayoría de casos suelen dar los valores sin cifras decimales, como ocurre en el ejemplo del modelo 3. Si tenemos en cuenta que el ocular es de 13.5x y los posibles valores de aumento según la posición del antejo de Galileo son de 0.75x, 1.2x, 1.85x, se obtienen los siguientes valores de aumento total con dos cifras decimales: 10.13x, 16.2x y 24.98x.

El rango de ajuste del ocular a las ametropías del observador y a la distancia interpupilar del mismo son también datos de interés. El primer valor depende del instrumento y del ocular que lleve incorporado, basta con comparar los valores del modelo 1 frente a los del modelo 3 para apreciar la variabilidad de valores. Así pues, el biomicroscopio del primer modelo con un ocular 10x se puede adaptar a observadores amétropes entre +8 D y -8 D mientras que el biomicroscopio del modelo 3 sólo puede compensar ametropías comprendidas entre +5D y -5D.

Un aspecto interesante del sistema de observación biomicroscopio es que permite

adaptar los oculares a la distancia interpupilar del observador gracias a los prismas inversores. Este hecho resulta esencial para garantizar la visión estereoscópica. El valor máximo de ajuste de la distancia interpupilar del optometrista varía notablemente de unos modelos a otros y generalmente está comprendido entre 43 mm y 87 mm.

Otros valores que suelen proporcionar los fabricantes son:

- Ángulo estereoscópico
- Si es adaptable a cámaras de video o fotográficas.
- Si es adaptable a un tonómetro Goldman.
- Otras aplicaciones, como medida del diámetro de la cornea y de las lentes de contacto.

En las figuras 5 a, b y c, se muestran tres ejemplos de la información más relevante que proporcionan varios catálogos junto con su interpretación.

¿Por qué los biomicroscopios no proporcionan grandes valores de aumento?

En general, el valor del aumento del biomicroscopio está comprendido entre 6x y 40x.

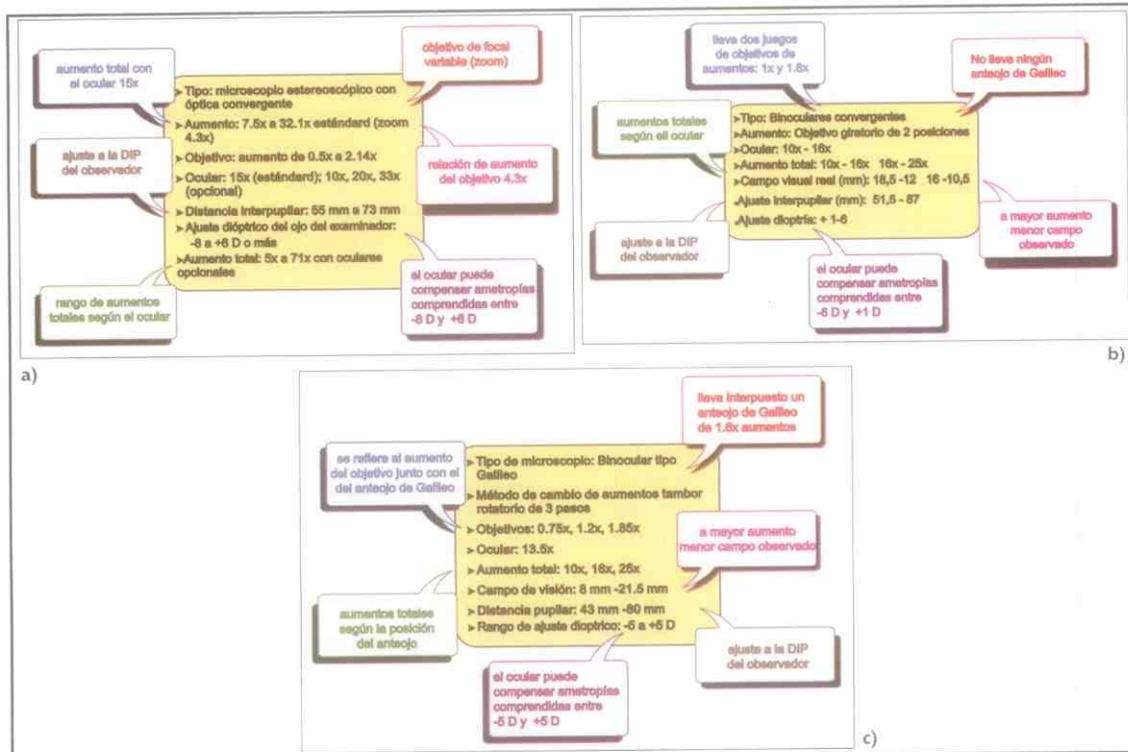


Fig. 5. Ejemplos de la información más relevante que proporcionan los catálogos comerciales junto con su interpretación.

valores pequeños si los comparamos con los valores que proporcionan los microscopios. Esto se debe a que al utilizar el biomicroscopio coexiste un interés y una necesidad; es decir, por una parte interesa tener una larga distancia de trabajo para poder manipular el ojo del paciente y por otra parte es necesario diseñar un sistema de observación que pueda compensar el movimiento del ojo del paciente, ya que éste se mueve constantemente aunque tenga la cabeza apoyada en la mentonera y se le diga que mantenga fija la mirada.

Una larga distancia de trabajo se consigue si también lo es la distancia focal del objetivo. El aumento del objetivo viene dado por la ecuación [3], donde t es un valor fijo y f'_{obj} es la distancia focal del objetivo, si ésta aumenta implica que se reduce el valor de aumento del objetivo que a su vez repercute en una disminución del aumento total del instrumento según la ecuación [1]

$$m_{ob} = \frac{-t}{f'_{ob}} \quad [4]$$

Por otra parte, un gran aumento conlleva muy poco campo, es decir reduciríamos la zona observada del ojo del paciente. Si a este efecto le añadimos los movimientos involuntarios del

paciente, puede suceder que sea difícil o incluso imposible realizar la observación ya que el campo observado es inversamente proporcional al aumento. Fijémonos en el modelo 3 de la tabla, donde nos indican que el aumento total puede valer 10x, 16x o 25x y el campo observado varía entre 8 mm y 21,5 mm. Cuando el aumento total es el menor (10x) el campo observado siempre es el mayor (21,5 mm) y viceversa. Así pues, con estos datos podemos averiguar el campo que le corresponde cuando se trabaja con el aumento total de 16x. Al ser valores inversamente proporcionales tenemos:

$$\text{campo}_{16x} = \frac{10}{16} 21,5 = 13,4 \text{ mm}$$

Para comprobar si el otro valor de campo (8 mm) es correcto, basta con realizar la misma operación

$$\text{campo}_{25x} = \frac{10}{25} 21,5 = 8,6 \text{ mm}$$

Se observa que hay una pequeña discrepancia entre el valor obtenido y el valor de la tabla. Esto se debe a las aproximaciones que se realizan.



Resolución y profundidad de enfoque

Una de las finalidades del biomicroscopio es observar y distinguir pequeñas alteraciones de los medios oculares, por consiguiente resulta necesario evaluar la resolución del instrumento considerando también la resolución del observador. La ecuación [4] nos proporciona el valor del tamaño mínimo distinguible ($r_{i+\sigma}$):

$$r_{i+\sigma} \approx \frac{250 u_o}{M} \quad [5]$$

Donde u_o es el ángulo de resolución del observador expresado en radianes y M es el aumento total del biomicroscopio. Así pues, un observador que resuelva $2'$ y que esté mirando a través de un biomicroscopio de 16x, puede distinguir pequeñas alteraciones oculares siempre que éstas sean mayores de 0,0091 mm. Nótese que si incrementamos el valor del aumento del biomicroscopio disminuye el valor de r .

Otro valor a tener en cuenta es la profundidad de enfoque debido a la acomodación del observador, es decir la variación de posición del ojo del paciente respecto al biomicroscopio que podemos permitirnos manteniendo el enfoque. La expresión de la profundidad de enfoque debida a la acomodación de un observador situado en la pupila de salida del biomicroscopio es la siguiente:

$$d_f = PP \left[\frac{0,25}{M} \right]^2 \quad [6]$$

Donde PP es la vergencia del punto próximo del observador y M es el aumento visual del instrumento (el resultado se obtiene en metros).

Aplicando la expresión [5] en el caso de un observador emélope con una amplitud de acomodación de 4 D ($PP = 4$ D) que utiliza un biomicroscopio de 16x, se obtiene una profundidad de enfoque de 0,98 mm. Este resultado muestra que podemos ver enfocados planos que disten entre si casi 1 mm. Evidentemente, la profundidad de enfoque varía en función del aumento total del biomicroscopio, aumentando al disminuir el valor de aumento.

Conclusiones

El biomicroscopio o lámpara de hendidura es un instrumento construido para examinar el

segmento anterior del ojo y sus anexos (córnea, conjuntiva, párpados...). En el marco de la optometría tiene una gran aplicación en contactología ya que permite realizar un examen meticuloso de las estructuras oculares en el momento de la prescripción y adaptación de lentes de contacto tanto en la fase inicial como en los controles posteriores.

Consta de dos partes claramente diferenciadas, el sistema de observación del ojo del paciente y el sistema de iluminación. En este artículo nos hemos centrado en el primer sistema, el cual se basa en un microscopio estereoscópico que permite aprovechar las ventajas de la visión binocular de usuario. Además, se le incorpora un sistema inversor de imagen formado por prismas, que permite ver las imágenes derechas, y un sistema intercambiador de aumentos, construido ya sea a partir del objetivo ya sea a partir de un anteojo de Galileo, que permiten variar el aumento a conveniencia del usuario.

El biomicroscopio es un instrumento con valores de aumento relativamente bajos, comprendidos entre 6x y 40x. Estos valores son suficientes para observar con detalle las estructuras oculares a la vez que permite una larga distancia de trabajo y un correcto valor del campo observado. Además, la resolución y profundidad de enfoque del instrumento también están relacionadas con el valor del aumento.

Al poder variar la DIP, mediante la rotación de los prismas inversores, se mejoran las prestaciones del instrumento ya que permite una mejor adaptación a las características biométricas del observador, no perdiendo así la capacidad de observación binocular ni la estereopsis.

Atendiendo a todas las características mencionadas podemos afirmar que el sistema de observación del biomicroscopio ocular es un instrumento de una gran complejidad y muy bien adaptado a las necesidades del observador gracias a su diseño, tanto mecánico como óptico, y a la elevada calidad de sus componentes ópticos.

Agradecimientos

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

Bibliografía

1. Henson DB. Optometric Instrumentation. 2nd edition. Oxford: Butterworth-Heinemann. 1996.
2. Antó J, Tomás N. Óptica Instrumental. Barcelona:Edicions UPC. 1996.