TEMA IV.- PRINCIPIOS ÓPTICOS

En este tema, vamos a describir las principales características de los *instrumentos ópticos* más utilizados, como ayudas para pacientes con baja visión. Para este fin, no es necesario referirnos aquí a problemas o necesidades de estos pacientes, que se han tratado o se tratarán en otros temas, porque estos instrumentos son también utilizados por personas con visión normal para realizar tareas específicas. Todos los instrumentos que vamos a ver son, en realidad, ayudas para la visión.

Los ojos emétropes y sanos también tienen sus limitaciones, la Agudeza Visual (AV) y el punto próximo (P), por ejemplo, son un límite en la visión de detalles espaciales. Generalmente, tendemos a acercarnos los objetos

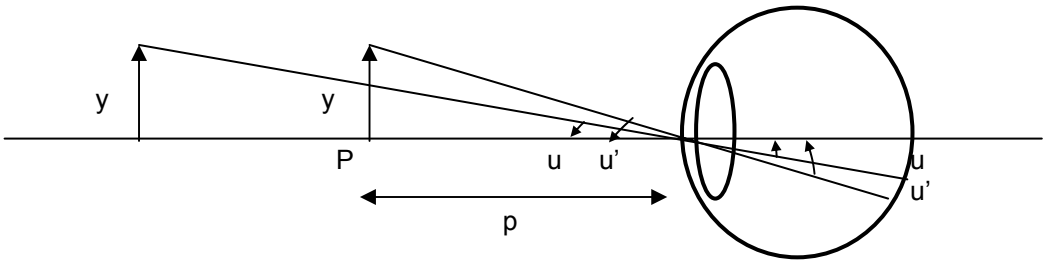

Figura 1.- Los objetos subtienden un ángulo mayor al acercarlos al ojo. Podrán ser vistos si el valor de su tamaño angular, u, supera el valor límite dado por la AV, siendo la distancia p entre el ojo y el punto próximo el máximo acercamiento posible.

pequeños para aumentar así el valor del ángulo bajo el que son vistos desde la pupila de entrada, PE, del ojo. La imagen que se forma sobre la retina es mayor cuando el objeto se acerca, como puede verse en la Figura1. Sin embargo, no es posible enfocar el objeto si está más cerca del ojo que el punto P, siendo éste nuestro límite de acercamiento.

¿Qué podemos hacer entonces para ver objetos cuyo tamaño está por debajo de nuestra AV? **La lupa y el microscopio** compuesto solucionan este problema, permitiéndonos aumentar en visión de cerca el ángulo u subtendido por el objeto.

Un caso distinto, es el que se nos presenta al mirar a lo lejos e intentar ver un objeto que subtiende un ángulo demasiado pequeño para nuestra AV. Ahora no se trata de acercarnos al objeto, que quizá está en el horizonte, pero necesitamos "algo" que aumente su tamaño angular u. Los instrumentos llamados **telescopios o anteojos** (también prismáticos o binoculares) son los que sirven de ayuda al ojo para ver objetos lejanos que subtienden un ángulo pequeño.

IV.1 - LA LUPA

Cualquier lente converge trabajando con el objeto situado entre la lente y el foco F, es decir, con distancia objeto, x, menor (en valor absoluto) que la distancia focal objeto f, actúa como **lupa**. En este instrumento la *imagen* es siempre *virtual, directa y mayor* que el objeto.

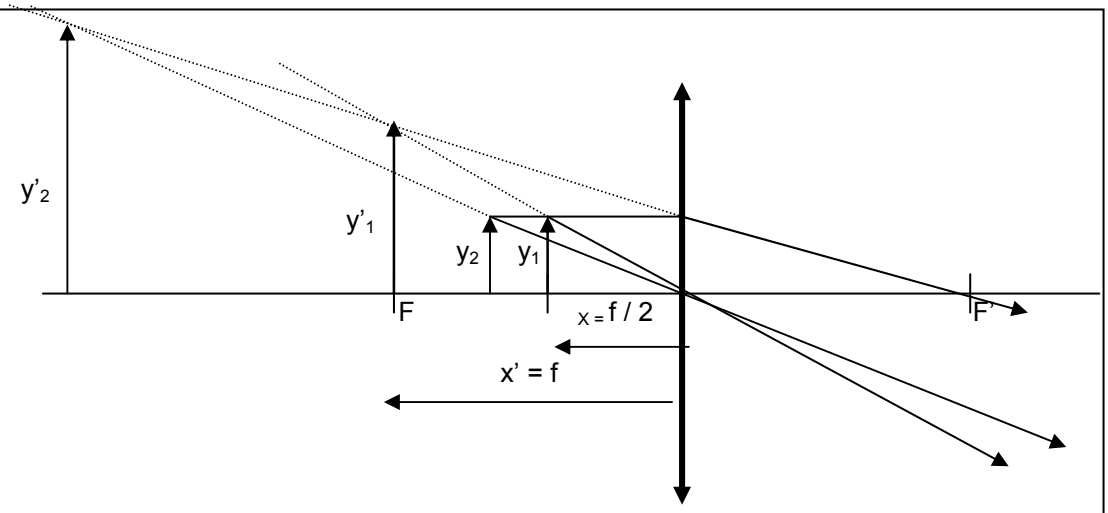

Figura 2.- Una lente delgada convergente actuando como lupa. La imagen es virtual, directa y mayor que el objeto.

IV.1.1 AUMENTO LINEAL

El aumento lineal (o aumento lateral) es, por definición, la razón entre el tamaño de la imagen, y', y el tamaño del objeto, y. Esto es:

En la lupa: $\beta' = y'/y > +1$; donde el signo positivo indica que la imagen es directa y virtual. En algunos textos a este aumento se le denomina *aumento relativo a la distancia*. La razón por la que se usa este nombre es evidente, si consideramos que en el caso de una lente en aire (como la lupa), este aumento puede calcularse como el cociente entre las distancias imagen y objeto (medidas desde la lente) respectivamente, es decir: **$\beta' = y'/y = x'/x$ (IV.1)**. Es importante resaltar que el valor de este aumento crece muy rápidamente cuando el objeto se sitúa cada vez más cerca del foco F. En la Figura 2 pueden verse, como ejemplo, la imagen de dos objetos y_1 e y_2 situados a diferente distancia de la lupa. Al objeto y_1 a distancia x = f/2 de la lente, le corresponde la imagen y'_1 sobre el foco, de modo que x' = f. En efecto, de la ecuación de Gauss se obtiene:

$$\frac{1}{x'} = \frac{1}{x} + \frac{1}{f'} \Rightarrow \frac{1}{x'} = \frac{2}{f} - \frac{1}{f} = \frac{1}{f} \Rightarrow x' = f \quad \text{y el aumento :} \quad \beta' = \frac{y'}{y} = \frac{x'}{x} = +2$$

Al objeto y_2, que está situado más cerca del foco que el anterior, le corresponde una imagen y'_2 de mayor tamaño y más alejada de la lente.

En resumen, recordemos que **el aumento lineal de la lupa** es tal que:

a) Si el objeto está situado entre la posición de la lente, x=0, y la posición x=f/2, el aumento β' sólo varía entre +1 y +2.
b) Pero al cambiar la posición del objeto entre x=f/2 y x=f el aumento toma valores desde +2 hasta infinito.

   En consecuencia, la lupa deberá utilizarse con el objeto situado en el foco F o muy cerca de éste para que el aumento lineal sea máximo.

Cualquier lente converge trabajando con el objeto a una distancia entre f y 2f de la lente, ya no actúa como lupa sino como un sistema de proyección, proporcionando una *imagen real, invertida y mayor* que el objeto, como se deduce del valor que toma el aumento lateral $\beta' = y'/y \leq -1$ y tal como vemos en la Figura 3. Aunque este caso no tiene relación directa con este tema, viene bien compararlo con la lupa para establecer las diferencias entre las imágenes reales y virtuales cuando son vistas por el ojo.

En efecto, las imágenes reales de la Figura 3 no se ven sino utilizando una pantalla en el plano imagen, cuya posición está perfectamente establecida, ya que situando la pantalla en otro plano ligeramente anterior o posterior la imagen se vería desenfocada. Pensemos, por ejemplo en un proyector de diapositivas ¿qué se ve sin pantalla? Un haz de luz, pero no una imagen.

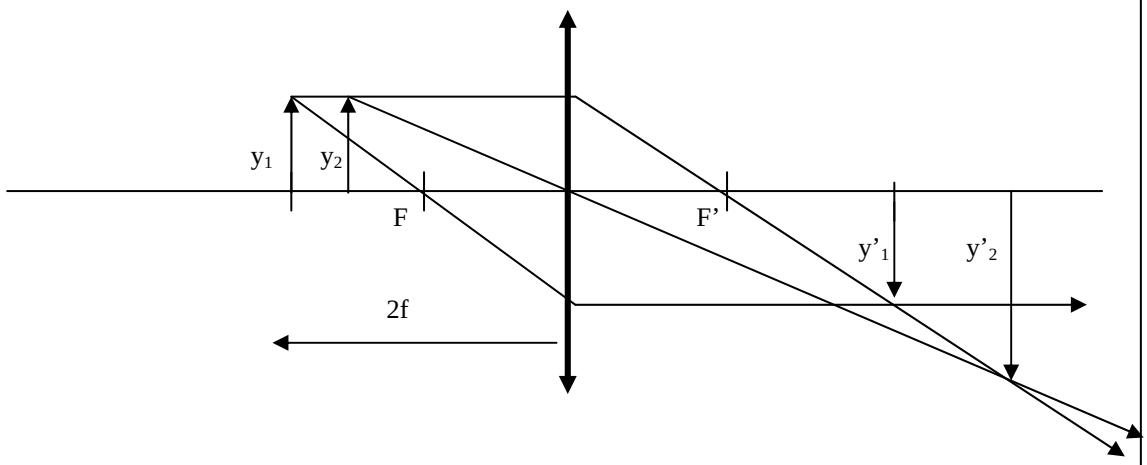

Figura 3.- Una lente delgada convergente actuando como sistema de proyección. La imagen es real invertida y mayor que el objeto.

Además, en este caso, el valor del aumento está perfectamente establecido para cada pareja de planos conjugados. Así entre y'_1 e y_1 el aumento lateral es –1 y entre y'_2 e y_2 el aumento es –2, en donde el signo menos sólo indica la posición invertida de la imagen respecto del objeto. El ojo percibe las imágenes de acuerdo con estos valores del aumento, por lo que verá y'_1 del mismo tamaño que y_1 e y'_2 de tamaño doble del de y_2.

Por el contrario, en el caso de la lupa al ser las imágenes virtuales no pueden ser recogidas sobre una pantalla, el ojo las ve con sólo situarse detrás de la lente y recibir la luz "procedente de la imagen". Para el ojo que ve la imagen virtual, es como si el objeto que está viendo estuviese allí ya que desde allí él ve llegar los rayos. Para recordar cómo en ojo ve las imágenes virtuales basta pensar un momento en las imágenes formadas por un espejo plano y que estamos tan acostumbrados a ver. En cualquiera de los instrumentos de ayuda que vamos a describir, el ojo va a ver imágenes virtuales. Casi siempre se suele formar la imagen en el infinito, para que el ojo la pueda ver con mayor comodidad y utilice el instrumento sin fatigarse a causa de la acomodación. La principal diferencia entre el caso de la imagen real (Figura 3) y la imagen virtual (Figura 2) cuando son vistas por el ojo es que el aumento, cuando vemos imágenes virtuales, ya no está tan claramente establecido.

Con el tamaño de las imágenes percibidas por el ojo se producen algunas paradojas. Por ejemplo: Cuando cambia el ángulo u con el cual es visto el objeto desde el ojo, cambia el *tamaño aparente* o tamaño percibido aunque no cambie el *tamaño real*. Esta paradoja de percibir un aumento que "realmente" no existe, se pone de manifiesto con frecuencia en nuestra vida cotidiana, aunque muchas veces, por costumbre, nos pasa desapercibida.

.

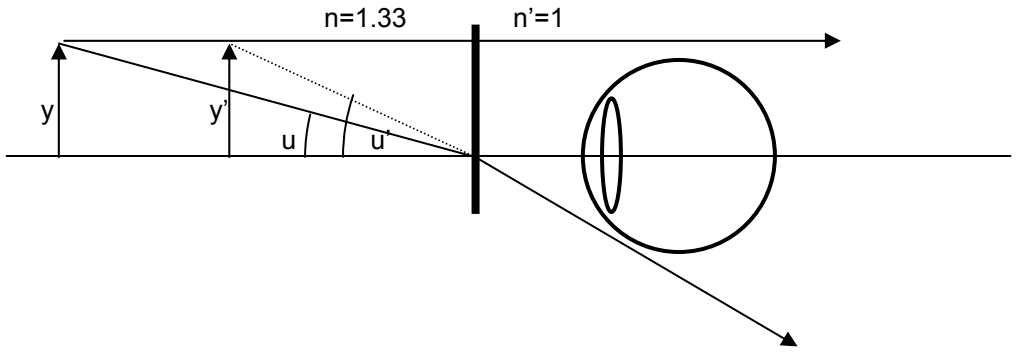

Figura 4.- En un dioptrio plano (agua-aire en este caso) el aumento lineal es +1. Sin embargo el ojo percibe un aumento angular al que llamaremos aumento visual.

Basta recordar la visión a través de unas gafas submarinas o la percepción de una moneda en el fondo de un estanque, por ejemplo, para darnos cuenta de

que el *tamaño aparente* de los objetos vistos a través de un *dioptrio plano* (Figura 4) es diferente de su *tamaño real* aunque, como sabemos, en estos dioptrios la imagen es siempre del mismo tamaño que el objeto: el aumento es siempre, para cualquier posición del objeto, β'=+1 Sin embargo, sí que **apreciamos un aumento** distinto de la unidad. En cualquier caso, estamos viendo un cambio de tamaño **que teóricamente no existe**[1]. La explicación se encuentra en el hecho que se ha representado en la Figura 1: dos objetos del mismo tamaño el ojo los ve con tamaño diferente si subtienden distinto ángulo.

Otras veces, se produce la paradoja contraria: El ojo forma una imagen de igual tamaño sobre la retina de todos los objetos o imágenes que ve bajo el mismo ángulo u como se observa en la Figura-5. Aunque tengan tamaños lineales muy diferentes. podrían parecer iguales para el ojo.

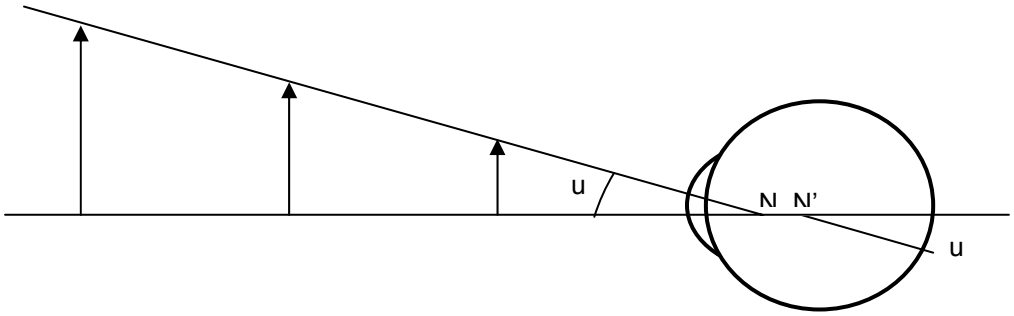

Figura 5.- Objetos de diferentes tamaños lineales, pero con el mismo tamaño angular, u, tienen el mismo tamaño sobre la retina del ojo. El ojo podría interpretar que son iguales.

IV.1.2 AUMENTO ANGULAR

De las paradojas descritas en el párrafo anterior se deduce que para el ojo, y todos los instrumentos que trabajan asociados con él, existe, además del aumento lineal o lateral, otro aumento al que llamaremos *aumento angular* o *aumento visual*, Γ, (para distinguirlo de otro aumento angular, γ, que se utiliza para la definición de puntos nodales) que se define como:

[1]. En algunos aspectos, este hecho es similar al cambio de tamaño aparente de la luna o el sol que se observa en determinadas circunstancias.

$$\Gamma = \frac{\text{tg } u'}{\text{tg } u} \qquad \textbf{(IV.2)}$$

Siendo u' y u los ángulos bajo los cuales se perciben los objetos desde el ojo con y sin instrumento respectivamente. En el ejemplo de la Figura 4, la gafa submarina tendría un aumento lineal β'=+1 pero un aumento angular que podría valer Γ= +2 si consideramos tg u' = 2 tg u.

Sea una lupa de potencia P_L que se utiliza a distancia h de la pupila de entrada, PE, del ojo, calculemos el valor del aumento Γ apoyándonos en la Figura 6.

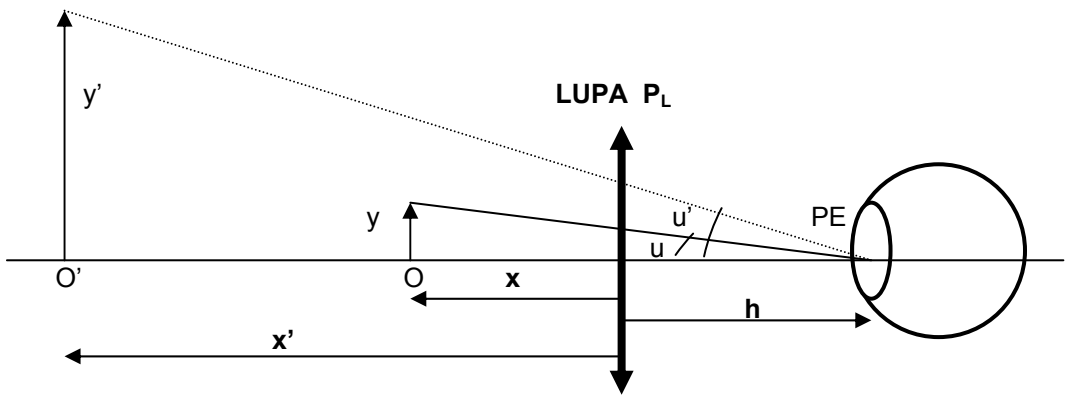

Figura 6.- Una lupa de potencia P_L forma de un objeto de tamaño y una imagen y'. El aumento visual Γ compara el tamaño angular del objeto desde la PE del ojo, visto con y sin instrumento.

De la Figura deducimos los valores de las distancias desde O y O' a la PE que son:

O'PE = O'H' +H'PE = -x' + h

OPE = OH' + H'PE = -x + h

con estos valores el aumento se escribe como:

$$\Gamma = \frac{\text{tg } u'}{\text{tg } u} = \frac{\dfrac{y'}{h - x'}}{\dfrac{y}{h - x}} = \frac{y'}{y} \cdot \frac{h - x}{h - x'} = \frac{x'}{x} \cdot \frac{h - x}{h - x'}$$

además podemos expresar la distancia imagen x' en función de la distancia objeto x, a través de la ecuación de Gauss, siendo entonces:

$$x' = \frac{xf'}{x + f'}$$

Sustituyendo este valor en la ecuación anterior y considerando que la potencia de la lupa P_L =1/f', con las simplificaciones oportunas el aumento angular resulta:

$$\Gamma = \frac{x - h}{x - h(1 + xP_L)} \qquad \textbf{(IV.3)}$$

En esta expresión se ve claramente que el valor que toma este aumento depende, además de la **potencia de la lupa P_L**, de dos factores: 1) posición del ojo respecto de la lente, **h** 2) posición del objeto, **x.** A estos dos hay que añadir un tercero: 3) elección de una distancia de referencia, **d**. Este último factor, que no se refleja en la ecuación anterior, resulta lógico si tratamos de comparar los tamaños angulares del objeto y su imagen en las mismas condiciones.

1) **Posición del ojo**: ¿Cómo depende el aumento Γ de la posición **h** del ojo respecto de la lupa?

Para verlo, a) hagamos en (IV.3) **h = f'**, lo que implica suponer que el ojo está situado en el foco imagen de la lente. Se obtiene:

$$\Gamma = 1 - xP_L \qquad \textbf{(IV.4)}$$

b) hagamos **h = 0** en la ecuación (IV.1), esto significa considerar el ojo pegado a la lente. En este caso el valor de Γ resulta constante e igual a la unidad, independientemente de la posición del objeto. Así se tiene:

$$\Gamma = 1 \qquad \textbf{(IV.5)}$$

con lo que este aumento no cuenta y sólo es considerable el aumento lineal que, como ya vimos, es máximo si el objeto se sitúa en el foco F o muy próximo a esa posición.

2) **Posición del objeto**: Cuando el objeto se sitúa en el foco de la lente F, además de conseguirse el máximo aumento lineal, se tiene la ventaja de que la imagen virtual se forma en el infinito. En este caso no importa la acomodación del sujeto y, en principio tampoco debería de influir la situación del ojo del sujeto respecto de la lente ya que los rayos le llegarían paralelos en cualquier situación. Pero, en la práctica, sí que tiene importancia la distancia, h, del ojo a la lente en este caso porque, aunque la imagen en la retina es siempre la misma, cuanto más **se aleja el ojo** menor es el ángulo con el que se ve el objeto y también la lente de modo que, por comparación, se aprecia un **incremento del aumento angular**.

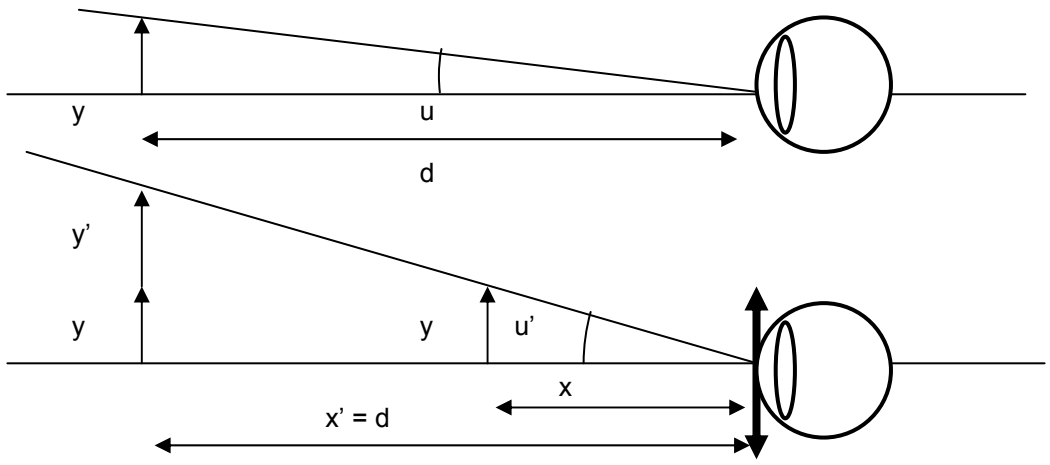

Figura 7.- **<u>El aumento convencional</u>** de una lupa compara el tamaño aparente u del objeto visto a una distancia d (cuyo valor es convenido) con el tamaño aparente u' de la imagen que forma la lupa a la misma distancia d. En ambos casos la acomodación del ojo es de +4 dioptrías si la distancia convencional es de 25 cm.

Haciendo x = f = -f' en la ecuación (IV.3) se tiene para este caso:

$$\Gamma = 1 + hP_L \qquad \textbf{(IV.6)}$$

3) **Distancia, d, de referencia:** Para poder comparar el aumento de diferentes lupas conviene establecer una distancia estandar o de referencia de modo que, en el aumento visual, comparemos el ángulo u que da el tamaño del objeto sin lupa a una determinada distancia, d, del ojo con el ángulo u' que da el tamaño de la imagen formada por la lupa, cuando situamos el objeto a una distancia x tal que x'=d . De este modo los tamaños angulares con y sin lupa se están comparando a la misma distancia, como se ve en la Figura 7.

Calculemos ahora el valor del aumento visual:

$$\Gamma = \frac{tg\ u'}{tg\ u} = \frac{\frac{y}{x}}{\frac{y}{x'}} = \frac{x'}{x} = 1 - \frac{x'}{f'} \quad \Rightarrow \quad \Gamma = 1 - \frac{d}{f'} \quad \Rightarrow \quad \Gamma = 1 - dP_L$$

$$\boxed{\Gamma_d = 1 + \frac{P_L}{4}} \qquad \textbf{(IV.7)}$$

Este **aumento convencional**, llamado así porque asignamos a la distancia d un valor convencional (negativo) de 25 cm, compara el tamaño aparente (u') de la imagen y' formada por la lupa a 25 cm del ojo, con el tamaño aparente (u) del objeto, y, si estuviera a 25 cm del ojo. Esta fórmula supone que el error refractivo ha sido corregido por una lente diferente a la que se considera y que, con o sin lente, se está utilizando una acomodación de +4 dioptrias.

Objeto en el foco: Cuando el objeto se sitúa en el foco la imagen se forma en el infinito, como vemos en la Figura 8.

El aumento toma el valor:

$$\Gamma = \frac{\frac{y}{f}}{\frac{y}{d}} = \frac{d}{f} = -\frac{d}{f'} = -dP_L \qquad \textbf{y haciendo d = - 25 cm resulta :}$$

$$\boxed{\Gamma_C = \frac{P_L}{4}} \qquad \textbf{(IV.8)}$$

Este es el llamado **aumento efectivo o comercial** de la lupa. Si la distancia de comparación se considera d = -40 cm, como recomiendan algunos autores, el aumento comercial sería:

$$\Gamma_C = \frac{P_L}{2.5}$$

La ecuación (IV.8) compara el tamaño aparente de la imagen y' formada por la lupa en el infinito con el tamaño aparente del objeto, y, si estuviera a 25 cm (o a 40 cm). Se está comparando una imagen que no requiere acomodación para ser enfocada con un objeto que requiere +4 dioptrias de acomodación para ser enfocado por el ojo. Esta ecuación supone que el error refractivo ha sido corregido por otra lente y que no se utiliza la acomodación cuando se mira a través de la lupa.

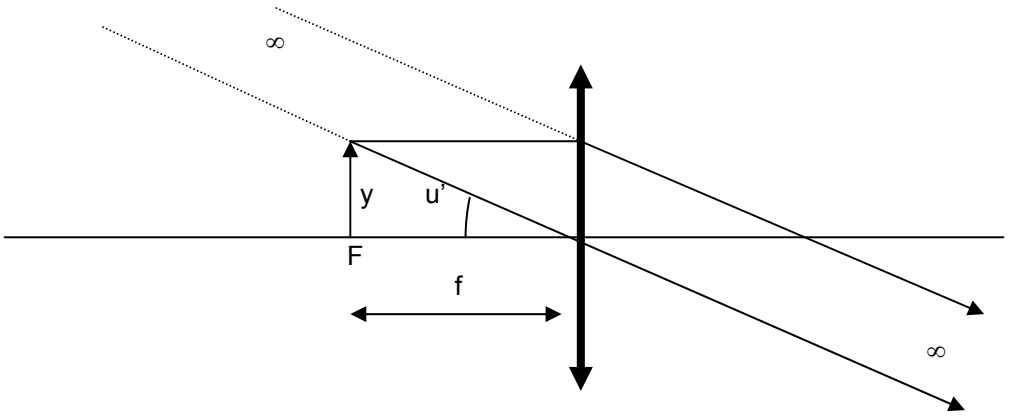

Figura 8.- Cuando el objeto se coloca en el Foco de la lupa la imagen se forma en el infinito. **El aumento comercial** compara el tamaño aparente u del objeto visto a una distancia d (normalmente de 25 cm) con el tamaño aparente u' de la imagen que se forma en el infinito. El objeto requiere una acomodación del ojo de +4 dioptrías mientras que la imagen se ve sin acomodación.

Si el error refractivo no ha sido corregido con otra lente, el aumento comercial de la lupa se calculará mediante la ecuación:

$$\Gamma = \frac{P_L - R}{4} \qquad \textbf{(IV.9)}$$

siendo R el valor de la refracción que se toma con signo positivo para los hipermétropes y negativo para los miopes.

Las ecuaciones (IV.7) y (IV.8) no son contradictorias sino que representan la misma idea bajo condiciones diferentes. En (IV.7) objeto e imagen se contemplan a igual distancia del ojo por lo que se está utilizando la misma acomodación para ver a ambos. En cambio, en (IV.8) el objeto se considera visto a distancia d y el ojo realiza la acomodación correspondiente para enfocarlo en la retina, mientras que la imagen puede verse sin acomodación por estar situada en el infinito.

En resumen, el aumento angular de la lupa:

1.- Si se utiliza la **lupa pegada al ojo** (h=0) este aumento angular es constante e igual a la unidad. Por lo tanto sólo el aumento lineal será importante para el ojo.

Por esta razón suele utilizarse la **lupa separada del ojo** porque así el aumento angular es *subjetivamente* mayor. Este crecimiento del valor del aumento angular a medida que separamos la lupa del ojo no es objetivamente cierto (si no cambiamos el tamaño de la imagen) pero se explica porque disminuye el campo angular que ocupa la lupa por lo que, por comparación, aumenta *subjetivamente* el tamaño angular de la imagen (Figura 10).

2.- Si se trabaja con el **objeto en el foco de la lente** (x=f) (que es el caso más común por dos razones:1ª el aumento lineal es máximo y 2ª no se necesita acomodación porque la imagen se forma en el infinito), y considerando la distancia de referencia de 25 cm para el objeto, se tiene el llamado aumento efectivo o comercial:

$$\Gamma_c = \frac{P_L}{4}$$

IV.1.3 CAMPO DE LA LUPA

El campo de la lupa depende de la potencia de la lente, P_L, de la distancia al ojo, h, y del valor de los radios de la lente, r, y de la pupila del ojo r_p. En la Figura 9 se representa el campo de plena iluminación que es una zona de radio OP sobre el plano del objeto. El valor de OP puede calcularse de la expresión:

$$\mathbf{OP = \frac{(r - r_p)}{h \cdot P_L}} \qquad \textbf{(IV.10)}$$

Esta ecuación nos dice que el campo disminuye al aumentar la potencia de la lente y la distancia h de la lente al ojo. El campo aumenta con el radio r de la lente, mientras que el radio r_P de la pupila del ojo prácticamente no influye nada en el valor del campo.

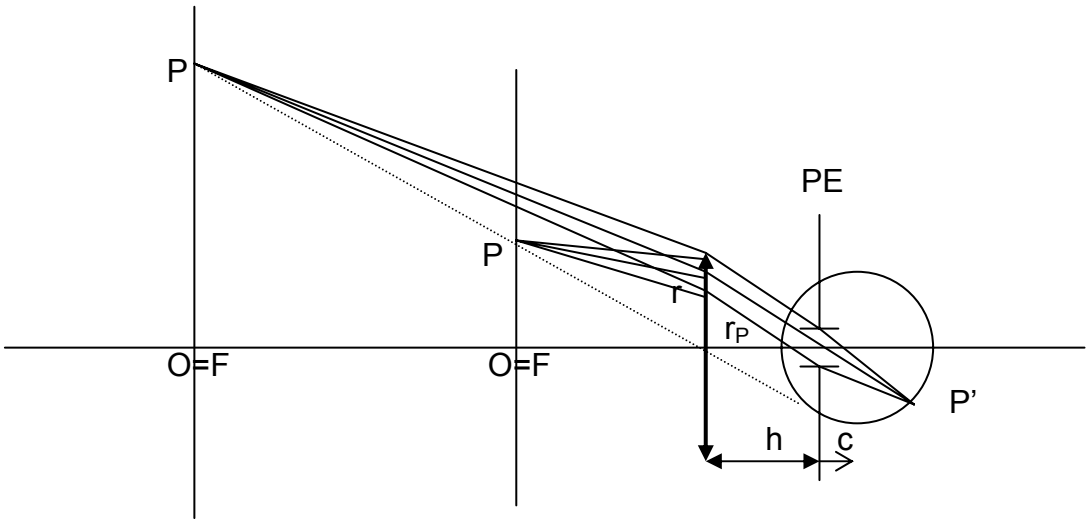

Figura 9.- El campo objeto de plena iluminación en la lupa es una zona de radio OP sobre el plano del objeto. El objeto está en el foco F de la lupa, la cual es de radio r y dista h de la PE del ojo que tiene un radio r_P. El rayo de luz que pasa por el extremo superior de la lupa y de la PE corta al eje óptico a la distancia c, cuyo valor se deduce de la semejanza de los triángulos que forma dicho rayo con el eje. Se han representado dos posiciones distintas del plano objeto(que es además el plano focal) para poner de manifiesto que el campo se reduce al aumentar la potencia de la lente (el objeto está más cerca).

La expresión (IV.10) se ha deducido desde la Figura 9 como sigue:

$$\frac{OP}{f}=\frac{r}{h+c} \rightarrow OP=\frac{r\cdot f}{h+c}$$ en donde el valor de c es :

$$\frac{r}{h+c}=\frac{r_p}{c} \rightarrow r\cdot c=r_p\cdot h+r_p\cdot c \rightarrow c=\frac{r_p\cdot h}{r-r_p}$$

sustituyendo este valor en la expresión de OP queda :

$$OP=\frac{r\cdot f}{h+\frac{r_p\cdot h}{r-r_p}}=\frac{r\cdot f}{h\left(\frac{r-r_p+r_p}{r-r_p}\right)}=\frac{r\cdot f}{\frac{h\cdot r}{r-r_p}}=\frac{r-r_p}{h\cdot P_L}$$

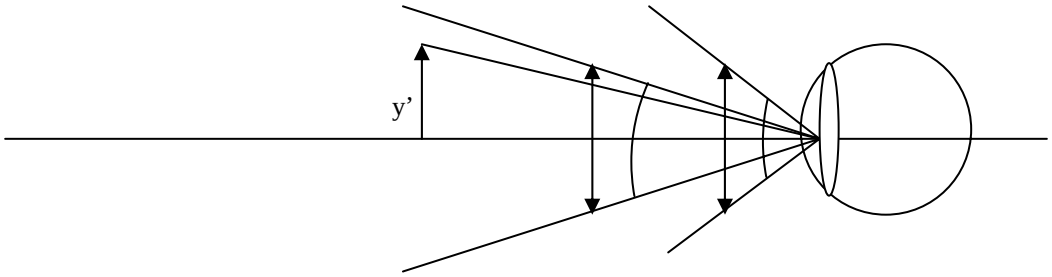

Figura 10. El campo angular que abarca la lente disminuye cuando la lente se separa del ojo. El tamaño ángular u' de la imagen y', aunque no varía, resulta subjetivamente mayor por comparación con el de la la lente al alejarse.

El campo de la lupa dado por la ecuación (IV.10) es un valor teórico que, en la práctica, puede verse bastante reducido por la presencia de aberraciones, como puede verse en la Figura 11. Principalmente son la distorsión, el coma, el astigmatismo por incidencia oblícua y la curvatura de campo las que más afectan. La aberración esférica y la cromática de posición son más fáciles de evitar combinando adecuadamente las curvaturas de las caras de las lentes (dobletes de lentes) o utilizando superficies asféricas.

Las lentes de Fresnel se han considerado una buena solución porque 1) permiten diámetros grandes 2) se reduce mucho el grosor y peso 3) se reducen las aberracuiones y 4) ofrecen la posibilidad de grandes efectos prismáticos por descentramiento. Sin embargo, el gran inconveniente que presentan es la bajada de contraste que hace que las rechacen muchos pacientes.

Figura 11.- Las aberraciones reducen el campo óptico de la lupa y demás instrumentos.

ADVERTENCIA: Las lentes de alta potencia que se utilizan como microscopios (para ver de cerca) tienen una variación apreciable en el valor de la potencia, según se considere ésta desde el vértice posterior o se estime desde el vértice frontal. La forma y el grosor de estas lentes es un factor muy importante y puede cometerse un error considerable al pedir al fabricante la lente prescrita para cataratas (que se calcula en función del vértice posterior) por la potencia del microscopio probado (ya que la potencia de los microscopios se calcula en función de la potencia al vértice frontal) sin utilizar la correspondiente compensación.

IV.2 – EL MICROSCOPIO COMPUESTO

El microscopio compuesto consta de dos sistemas ópticos, acoplados a una distancia tal, que desde el foco imagen del primero al foco objeto del segundo hay una distancia t positiva llamada *longitud óptica*. Por simplicidad, representaremos como lentes delgadas convergentes a estos dos sistemas: 1) *el objetivo* proporciona una imagen real e invertida del objeto (imagen intermedia) con un aumento lineal β' 2) *el ocular* es una lupa trabajando con objeto en su foco F_{oc}, su aumento será $\Gamma = 250/f'_{oc} = P_L/4$.

En conjunto, el microscopio compuesto trabaja como una lupa, ya que se enfoca de tal manera que el objeto se sitúe en el foco F del sistema total. En la Figura 11 vemos un esquema de su funcionamiento.

IV.2.1 AUMENTO

El aumento del microscopio compuesto es el producto de los aumentos de objetivo y ocular:

$$\boxed{\Gamma = \beta'_{ob} \cdot \Gamma_{oc}} \qquad \textbf{(IV.11)}$$

$$\text{en donde} \quad \Gamma_{oc} = \frac{P_L(oc)}{4} = \frac{25}{f'_{oc}} \; ; \; \beta'_{ob} = \frac{y'}{y} \quad \text{y} \quad \Gamma = \frac{P_L(tot)}{4} = \frac{25}{f'}$$

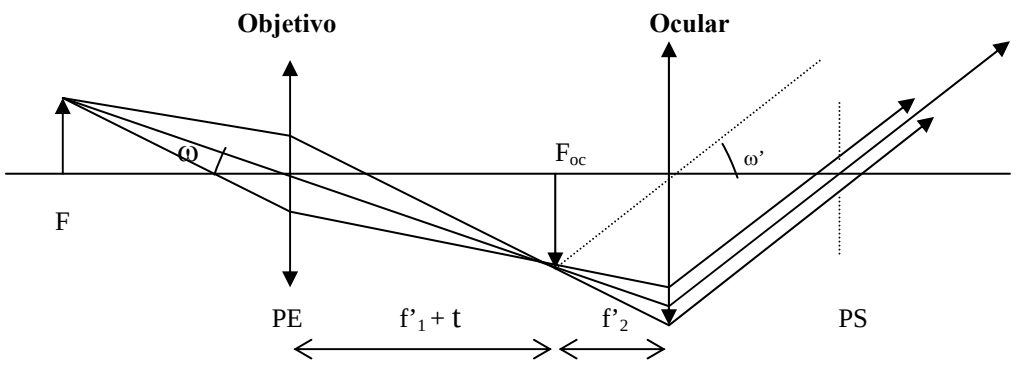

Figura 12.- El microscopio compuesto funciona como una lupa. El aumento es el producto del aumento lateral del objetivo por el aumento comercial del ocular.

conocidas las focales f'_1 y f'_2 del objetivo y ocular respectivamente y la longitud óptica del microscopio t (distancia de F'_1 a F'_2) el aumento puede calcularse como:

$$\Gamma = \frac{tg\omega}{tg\omega} = \frac{f'_1+t}{f'_2}$$

IV.2.2 CAMPO DEL MICROSCOPIO

Todo lo que se ha tratado con detalle para la lupa o microscopìo simple es aplicable también al microscopio compuesto. Sin embargo la expresión para calcular el *campo objeto de plena iluminación* es más compleja y, aunque de sencilla demostración, no la vamos a deducir aquí por no extender más estos apuntes. El tamaño del citado campo es:

$$\overline{OP} = \frac{f'_1 f'_2}{t(f'_1+t)}\left[\frac{R_2(f'_1+t)-R_1 f'_2}{f'_1+t+f'_2}\right] = \frac{f'_1}{t}\frac{1}{\Gamma}\left[\frac{R_2(f'_1+t)-R_1 f'_2}{f'_1+t+f'_2}\right] \qquad \textbf{(IV.12)}$$

donde R1 y R2 son los radios de abertura útil de objetivo y ocular respectivamente.

IV.2.3 APERTURA NUMÉRICA

Este dato viene reseñado en todos los microscopios y es fundamental para conocer la iluminación en la imagen. Como es sabido, esta magnitud está directamente relacionada con el tamaño de las pupilas de entrada y salida, el cual indica la cantidad de luz que llega a la imagen a través del instrumento. Su valor es: **AN = n· sen** σ siendo n el índice de refracción del espacio objeto y σ el ángulo que forma con el eje óptico el rayo que parte del pie del objeto y alcanza el extremo de la PE (que está en el objetivo). La relación entre el diámetro de la PS y la AN es:

$$\Phi_{PS} = 500\frac{AN}{\Gamma} = 2\frac{AN}{P_L} \qquad \textbf{(IV.13)}$$

siendo Γ y P_L el aumento y la potencia del microscopio completo. Esta relación pone de manifiesto **la poca luminosidad que se tiene con microscopios de alta potencia.**

IV.3 EL TELESCOPIO

Al igual que el microscopio compuesto, el telescopio está formado por dos sistemas ópticos: *objetivo y ocular*. Sin embargo, éstos están acoplados entre sí de tal forma que el foco imagen del objetivo coincide con el foco objeto del ocular, $F'_{ob} = F_{oc}$, resultando así que t=0. A los sistemas que cumplen esta condición se les llama *afocales* (por carecer de puntos focales F y F') o *telescópicos* (por ser la característica propia de estos instrumentos).

Los telescopios suelen utilizarse para mirar al infinito, pero también pueden usarse para ver objetos más cercanos y entonces se les suele llamar *anteojos* (también los llamados *binoculares o prismáticos* son sistemas basados en el mismo principio).

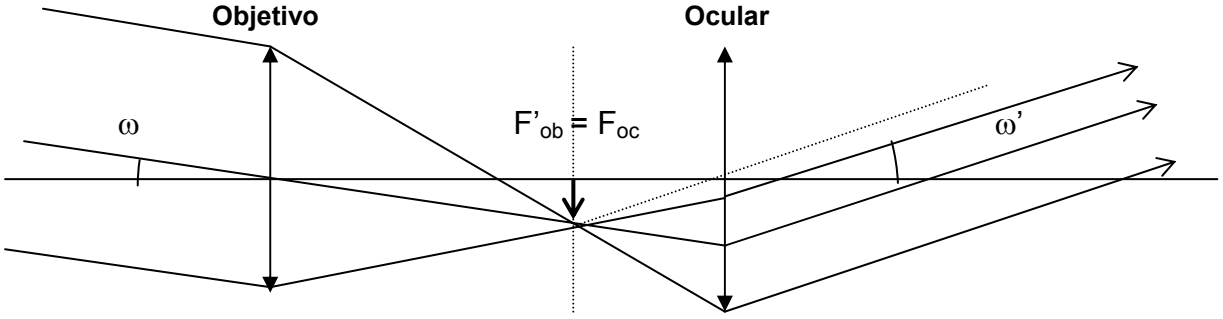

Figura 13. El telescopio forma, de un objeto lejano que subtiende un pequeño ángulo ω, una imagen en el infinito que subtiende un ángulo mayor ω', de modo que el aumento es tg ω'/tg ω.

IV.3.1 AUMENTO

En la figura 13 se observa que la imagen intermedia y' es real e invertida, está relaciona con las focales de objetivo y ocular, f'_1 y f'_2 respectivamente, así como, con los ángulos objeto ω e imagen ω', de modo que podemos escribir:

$$\Gamma = \frac{tg\,\omega'}{tg\,\omega} = -\frac{y'/f'_2}{y'/f'_1} = -\frac{f'_1}{f'_2} \qquad \textbf{(IV.14)}$$

el signo negativo del aumento sólo indica la inversión de la imagen.

IV.3.2 APERTURA RELATIVA

La abertura relativa se utiliza en estos instrumentos que trabajan con objetos lejanos, indicando lo mismo que la A.N. en el microscopio. Su valor se obtiene por el cociente entre el diámetro de la PE, que es el objetivo, y la focal de éste.

$$AR = \frac{\Phi_{ob}}{f'_{ob}} \qquad \textbf{(IV.15)}$$

IV.3.3.EMERGENCIA PUPILAR

Para una buena calidad de visión, el ojo debería situarse en la PS del instrumento, de lo contrario se tienen recortes en la imagen. Por ello interesa conocer la distancia desde el ocular hasta la pupila de salida llamada *emergencia popular*

$x'_{PS} = \frac{f'_1 + f'_2}{\frac{f'_1}{f'_2}} = \frac{-e}{\Gamma}$ donde e es la distancia entre objetivo y ocular y Γ' es negativo

por otra parte sabemos que el diámetro de la pupila de salida es:

$$\Phi_{PS} = \frac{-\Phi_{ob}}{\Gamma'}$$

IV.3.4 CAMPO DEL TELESCOPIO

En el telescopio, el valor del campo objeto de plena iluminación es angular ya que el objeto está en el infinito. El ángulo ω_P que da el semi-campo de plena iluminación se calcula de la ecuación:

$$tg\omega_P = -\frac{R_2 - R_{PS}}{x'_{PS}\Gamma'} = \frac{1}{e}\left(R_2 + \frac{R_1}{\Gamma'}\right) \qquad \textbf{(IV.16)}$$

donde R_1 y R_2 son los radios de abertura útil de objetivo y ocular respectivamente y e la distancia de acoplamiento entre objetivo y ocular.

La especificación comercial que normalmente se encuentra en estos instrumentos es a x d: aumento x diámetro del objetivo.

La imagen que da un telescopio como el de la Figura 13 es, como se ha dicho*, invertida* lo cual no es inconveniente en los telescopios que se utilizan para observaciones astronómicas; sin embargo, los telescopios utilizados para visión terrestre lejana llevan, entre objetivo y ocular, un dispositivo inversor de imagen para enderezar la imagen intermedia y'. A un telescopio así se le conoce como *anteojo terrestre*.

IV.4 EL ANTEOJO DE GALILEO

Su funcionamiento es igual al del telescopio anterior, con la diferencia de ser el ocular divergente lo cual evita la inversión de la imagen. El esquema de funcionamiento se ve en la Figura 14. El objetivo dirige los rayos que vienen del objeto lejano hacia la imagen intermedia y', pero antes de llegar a ese punto (Foco imagen del objetivo = Foco objeto del ocular) el ocular divergente hace que salgan los rayos paralelos entre sí y hacia el infinito.

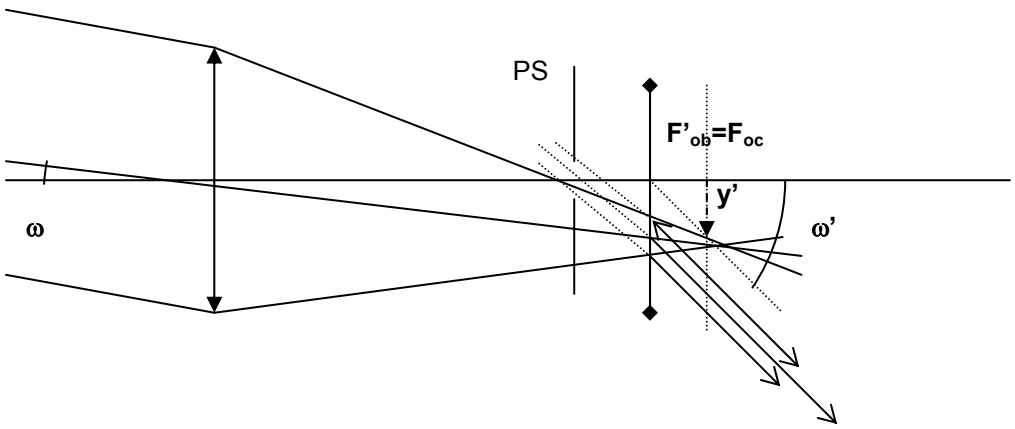

Figura 14. El anteojo de Galileo utiliza un ocular divergente con lo que se evita la inversión de la imagen. La pupila de salida es virtual lo que impide situar el ojo correctamente.

IV.4.1 AUMENTO

La única diferencia con el aumento del telescopio es el signo del aumento que en este instrumento es positivo, dado que la imagen es directa y no invertida.

$$\Gamma = \frac{tg\,\omega'}{tg\,\omega} = -\frac{y'/f'_2}{y'/f'_1} = -\frac{f'_1}{f'_2} \qquad \textbf{(IV.17)}$$

destaquemos el hecho de que en esta relación las focales de objetivo y ocular son de signo contrario por lo que el aumento resulta positivo.

IV.4.2 APERTURA RELATIVA

En este apartado no existe ninguna diferencia con el caso del telescopio.

IV.4.3.PUPILA DE SALIDA

Un inconveniente del anteojo de Galileo es que la pupila de salida es virtual y está situada en el interior del instrumento (Figura 14). Esto hace que el sujeto no pueda situar el ojo correctamente y puede tener recortes en el campo visual en forma de ojo de herradura.

La posición y diámetro de la PS se expresan en las siguientes relaciones:

que son las mismas que las del telescopio con la salvedad ya indicada del signo del aumento.

$\Phi_{PS} = \frac{-\Phi_{ob}}{\Gamma'}$; $x'_{PS} = \frac{-e}{\Gamma}$ donde e es la distancia entre objetivo y ocular y Γ' es positivo

IV.4.4 CAMPO ANGULAR

En este instrumento no puede situarse el diafragma de campo sobre la imagen intermedia, como se hace en los telescopios en que esta imagen es real, lo que da lugar a que la limitación del campo no sea la más adecuada. En lugar de tener todo el campo con plena iluminación se tiene el efecto de viñeteado de los haces de luz, que hace que la iluminación vaya decreciendo

hasta el valor límite del campo. Por esta razón daremos el valor del campo de iluminación media:

$$\mathbf{tg\omega_m = \frac{\Phi_{ob}}{2e\Gamma'}} \qquad \mathbf{(IV.18)}$$

en donde se ha considerado el ojo pegado al ocular.