



UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO



**CENTRO DE INVESTIGACIONES
EN ÓPTICA, A.C.**

**ESTUDIO Y SOLUCIÓN DE ALGUNOS
PROBLEMAS EN EL DISEÑO DE
SISTEMAS ÓPTICOS**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN CIENCIAS (ÓPTICA)**

Tesis presentada por:

Víctor Manuel Durán Ramírez

León, Gto.

Diciembre del 2004

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) y al Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Guanajuato (CONCyTEG) por el apoyo económico otorgado durante mis estudios de doctorado.

Al Centro de Investigaciones en Óptica, A. C. (CIO), en especial a la Dirección de Formación Académica a cargo del Dr. Manuel Servín. A Mary, Laura, Paty y Guille a las que les estoy muy agradecido por toda su ayuda y amistad.

Un agradecimiento muy especial a la Lic. Guillermina Muñiz (Guille) por todo el apoyo brindado pero, sobre todo, por su amistad.

A mi asesor, el Dr. Daniel Malacara Doblado por su guía, paciencia y respaldo.

Al Dr. Daniel Malacara Hernández por sus invaluable comentarios y consejos.

A Marcial Montoya por sus atinados comentarios a la tesis, por su ayuda y por ser mi amigo.

A todos mis amigos, en especial a Jesús Muñoz, Iván Moreno y Lizbeth Castaneda.

Dedicatorias

A mis padres:

Ana María Ramírez Chávez y José de Jesús Durán Gómez a quienes les agradezco, dentro de muchas cosas, el haberme dado la vida.

A mis hermanos:

Susana, Chuy, Lidia, Elia, Alejandro, Julieta, Jessica y Abraham.

A mis cuñadas:

Adriana y Araceli.

Índice

Lista de Figuras	iv
Lista de cuadros y tablas	vi
Capítulo 1	
Introducción	1
Capítulo 2	
Definiciones y conceptos importantes de diseño óptico	4
2.1 Introducción	4
2.2 Fundamentos de la óptica geométrica	4
2.2.1 Leyes de reflexión y refracción	5
2.2.2 Tipos de rayos	7
2.2.3 La región paraxial	8
2.2.4 Trazo de rayos en una superficie esférica	9
2.2.5 Stop, pupilas de entrada y salida de un sistema y rayo principal	13
2.2.6 Viñeta	15
2.3 Teoría de aberraciones	17
2.3.1 Aberraciones de primer orden y alto orden	18
2.3.2 Aberración cromática axial	20
2.3.3 Aberración cromática de amplificación	20
2.3.4 Aberración de esfericidad	21
2.3.5 Aberración de coma	22

2.3.6 Astigmatismo	25
2.3.7 Curvatura de campo	28
2.3.8 Distorsión	29
2.4 El ojo humano	30
2.4.1 Constantes ópticas del ojo	30
2.4.2 Componentes anatómicas del ojo	32
2.5 Referencias	36

Capítulo 3

Corrección de la aberración de keystone en proyectores de acetatos

3.1 Introducción	37
3.2 Proyector de acetatos convencional	37
3.3. Aberración de keystone	40
3.4 Proyector de acetatos	44
3.5 Diseño del sistema óptico	46
3.6 Conclusiones	54
3.7 Referencias	54

Capítulo 4

Algunas consideraciones respecto a la ubicación de la pupila de salida en algunos sistemas visuales

4.1 Introducción	56
4.2 Algunas consideraciones respecto a la posición ideal de la pupila del observador	58
4.3 Sistemas con una pupila de salida fija y accesible	62
4.4 Sistemas donde el stop es la pupila del ojo	69

4.5 Sistemas con una pupila de salida fija e inaccesible	72
4.6 Conclusiones	73
4.7 Referencias	73
Conclusiones y trabajo a futuro	75
Publicaciones generadas	77

Lista de Figuras

- Fig. 2.1** Diagrama que ilustra la ley de reflexión cuando un rayo que parte del punto P_1 llega al punto P_2 después de reflejarse en un espejo plano.
- Fig. 2.2** Diagrama que ilustra la ley de refracción, cuando el rayo sale de P_1 y llega a P_2 , cuando se refracta sobre la superficie refractora S .
- Fig. 2.3** Refracción de un rayo meridional en una superficie que separa dos medios.
- Fig. 2.4** Sistema óptico con el stop al centro.
- Fig. 2.5** Viñeteado en un sistema de componentes separados. El cono de rayos del punto D está limitado por la orilla más inferior de la lente A y la orilla más superior de B , y es más pequeño que el cono aceptado del punto C . El rayo más superior de D justo pasa a través de la imagen de la lente B la cual es formada por la lente A .
- Fig. 2.6** Las aperturas del sistema óptico de la Fig. 1.5 cuando son vistas desde el punto D .
- Fig. 2.7** Aberración de esfericidad en una superficie esférica (a) refractora y (b) reflectora
- Fig. 2.8** Rayos tangenciales y sagitales en un sistema óptico.
- Fig. 2.9** Formación de la imagen comática según Abbe.
- Fig. 2.10** Formación de la imagen comática: (a) distribución de los rayos sobre la pupila de entrada; (b) cruce de los rayos en el plano focal; (c) dimensiones de la coma_s y la coma_t; (d) forma final de la imagen comática.
- Fig. 2.11** Imagen astigmática, mostrando las posiciones de los focos tangencial y sagital.
- Fig. 2.12** Superficies focales tangencial, sagital y de Petzval, en un sistema óptico.
- Fig. 2.13** Imagen astigmática en cinco planos focales diferentes.
- Fig. 2.14** Objeto cuadrado e imágenes con distorsión.
- Fig. 2.15** Esquema anatómico del ojo humano.
- Fig. 3.1** Típico proyector de acetatos
- Fig. 3.2** Lente proyectora del proyector de acetatos
- Fig. 3.3** Aberración de keystone en un proyector de acetatos.

Fig. 3.4 Inclínación de los planos objeto e imagen: a) Inclínación del plano imagen, b) inclinación de los planos objeto e imagen para hacerlos paralelos entre ellos, c) los planos objeto e imagen y el plano de la lente intersecan en una línea común, d) los tres planos son paralelos entre ellos.

Fig. 3.5 (a) Arreglo desplegado del proyector de acetatos e (b) esquema final usando un espejo plano en la parte superior de la lente proyectora.

Fig. 3.6 Dimensiones del objeto cuadrado normalmente usado en un proyector de acetatos.

Fig. 3.7 Lente comercial típica para un proyector de acetatos.

Fig. 3.8 Diagrama de manchas para la típica lente comercial mostrada en la Fig. 2.7.

Fig. 3.9 Lente diseñada para el proyector de acetatos.

Fig. 3.10 Diagrama de manchas para la lente diseñada mostrada en la Fig. 2.9.

Fig. 3.11 Configuración de la lente con el espejo plano deflectante.

Fig. 4.1 Casco de despliegue binocular.

Fig. 4.2 Pupila de salida en una lente oftálmica y en un telescopio Galileano.

Fig. 4.3 Tamaño del Stop Aparente cuando el ojo rota en su cuenca en sistemas ópticos donde el stop y la pupila de salida del sistema están en la pupila del ojo.

Fig. 4.4 Ilustración del bloqueo de la luz por la pupila del ojo para dos diferentes posiciones el ojo del observador.

Fig. 4.5 Región de interferencia de la pupila de entrada del ojo y la pupila de salida del instrumento.

Fig. 4.6 Diámetro de la pupila de ojo para que no exista viñeta, cuando la pupila de salida del sistema es colocada en el centro del globo ocular, en instrumentos donde la pupila se salida está determinada por un stop físico que no es la pupila del ojo.

Fig. 4.7 Bloqueo de la luz de un objeto en el lado opuesto del eje óptico por la pupila del ojo del observador cuando el ojo es rotado y la pupila de salida está en el centro del globo ocular.

Fig. 4.8 Objetos observados en eje y fuera de eje en un sistema óptico visual.

Fig. 4.9 Un Telescopio Galileano con una pupila de salida virtual.

Lista de Cuadros y Tablas

Cuadro 2.1 Constantes ópticas del ojo humano promedio.

Tabla 3.1.- Diseño de una lente proyectora de un proyector de acetatos comercial.

Tabla 3.2.- Diseño en el proyector de acetatos para eliminar la distorsión de keystone.

Capítulo 1

Introducción

El área del diseño óptico es una de las áreas que en apariencia, por ser una de las más tradicionales de la óptica, parece un campo que ofrece pocas posibilidades de obtener resultados novedosos de alguna investigación; sin embargo, sigue siendo un área en la cual aún hay mucho por investigar. Aunque no es el tema de esta tesis, un ejemplo es la solución al problema de generar y evaluar superficies esféricas. Las superficies esféricas elevan la calidad de las imágenes y frecuentemente reduce el número de elementos ópticos necesarios. La fabricación de estas superficies no es simple, y en ocasiones puede ser hasta imposible construirlas. Es por ello que actualmente se ha convertido en un extenso campo de investigación en el Center for Optical Manufacturing of the University of Rochester, Rochester, N. Y., donde se han avocado al desarrollo de nuevas tecnologías aplicadas a la fabricación y evaluación automática de dichas superficies.

Otro ejemplo es el tema del presente trabajo. El objetivo del presente trabajo de investigación consiste en la solución de dos problemas relacionados con el diseño de sistemas ópticos. En el primero de ellos se propone una modificación del típico proyector de acetatos para eliminar la distorsión de keystone. Debido a esta distorsión la orilla superior de la imagen proyectada

es más grande que la orilla inferior, y ocurre cuando el espejo del proyector de acetatos es inclinado para subir la imagen sobre la pantalla. En el segundo, se describen las distintas posibilidades para la mejor ubicación de la pupila del ojo en algunos instrumentos ópticos visuales, donde comúnmente se asume que dicha posición es en la pupila de salida del instrumento que, como se verá, no necesariamente es así.

En el capítulo 2 se definen los términos y conceptos necesarios de diseño óptico para que, aquellas personas que no estén muy involucradas en el diseño óptico o para aquellas que comiencen en el estudio de esta área, comprendan mejor el contenido de los temas.

En el capítulo 3 se hace una breve descripción del funcionamiento y configuración de un proyector de acetatos convencional y de la aberración de keystone, que se presenta en estos instrumentos cuando el espejo que forma parte de la configuración de dicho proyector, es inclinado para subir la imagen sobre la pantalla y de esa manera sea más visible para la audiencia. Debido a la presencia de esta distorsión la orilla superior de la imagen cuadrada proyectada es más grande que la orilla inferior. Se propone una solución para la corrección de dicha aberración. Se muestran las modificaciones propuestas a la configuración del proyector para corregirla y, por último, los resultados de la simulación del diseño modificado, obtenidos mediante el programa "Oslo" de diseño óptico, son presentados y discutidos. Este capítulo se basa en el artículo "*Keystone Aberration Correction in Overhead Projectors*" aceptado para su publicación en la revista *Applied Optics* (Mayo de 2004).

En el capítulo 4 se analizan algunos de los muchos factores que determinan la mejor posición para la pupila del ojo del observador con respecto al sistema óptico y, en base a esos factores, se describen las distintas posibilidades para la ubicación de la pupila del ojo en algunos instrumentos ópticos visuales. Este capítulo se basa en el artículo "*Some Considerations Regarding the Exit Pupil Location in Some Visual Systems*" aceptado para su publicación en la *Revista Mexicana de Física* (Enero de 2004).

Finalmente, se presentan las conclusiones y el trabajo a futuro de este proyecto de investigación.

Capítulo 2

Definiciones y Conceptos Importantes de Diseño Óptico

2.1 Introducción.

El objetivo de este capítulo es el de definir los términos y conceptos importantes de diseño óptico, haciendo especial hincapié en aquellos usados en el desarrollo de la presente tesis. Se comenzará definiendo los términos más importantes de la óptica geométrica, después se dará un repaso a la teoría de aberraciones en los sistemas ópticos y finalizaremos con el ojo humano, definiendo sus constantes ópticas y sus componentes anatómicas. En este capítulo se verán los conceptos básicos de la óptica geométrica.

2.2 Fundamentos de la óptica geométrica.

La *óptica geométrica* es la rama de la óptica que estudia la propagación de la luz usando el concepto de rayo luminoso. Por definición un rayo de luz representa la dirección en la que se propaga la energía de una onda de luz (Malacara, 2004). Estos rayos, en medios homogéneos, son considerados como líneas rectas. La óptica geométrica sin embargo, no incluye algunos de los aspectos del modelo ondulatorio de la propagación de la luz y por lo tanto no toma en cuenta los efectos de interferencia y

difracción. La óptica geométrica es el punto de arranque del diseño de todos los sistemas ópticos; frecuentemente es el punto final (Hopkins, 1962).

2.2.1 Leyes de reflexión y refracción.

Leyes de Reflexión.

La primera ley de la reflexión (Malacara, 2004) dice que el rayo incidente, el rayo reflejado y la normal a la superficie reflectora están en un plano común (Fig. 2.1). Y la segunda ley dice que la magnitud del ángulo de reflexión es igual a la magnitud del ángulo de incidencia, es decir $I = I'$

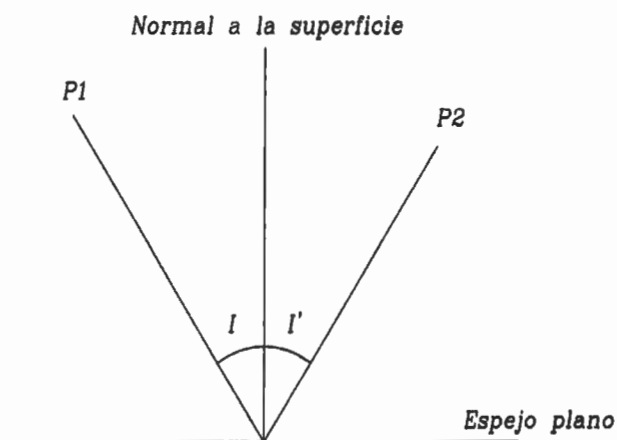


Fig. 2.1 Diagrama que ilustra la ley de reflexión cuando un rayo que parte del punto P_1 llega al punto P_2 después de reflejarse en un espejo plano

Leyes de Refracción.

La primera ley de la refracción (Kidger, 2002) dice que el rayo incidente, el rayo refractado y la normal a la superficie refractora están en un plano común (Fig. 2.2). Y la segunda ley, llamada también *ley de Snell*, establece que si el ángulo entre un rayo incidente y la normal a la superficie en el punto de incidencia, llamado el *ángulo de incidencia*, es I ; y si el *ángulo de refracción*, el ángulo entre el rayo refractado y la normal, es I' ; entonces los ángulos están relacionados por la ecuación

$$N \operatorname{sen} I = N' \operatorname{sen} I' \quad (2.1)$$

donde N y N' son los índices de refracción de los dos materiales.

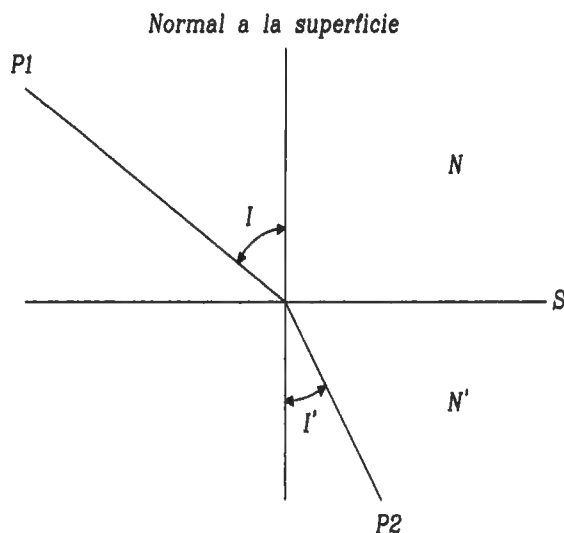


Fig. 2.2 Diagrama que ilustra la ley de refracción, cuando el rayo sale de P_1 y llega a P_2 , cuando se refracta sobre la superficie refractora S .

2.2.2 Tipos de rayos.

Como ya se mencionó, la óptica geométrica está basada en el concepto de rayos de luz, los cuales se asume son líneas rectas en cualquier medio homogéneo y son desviados en una superficie que separa dos medios que tienen diferente índice de refracción (segunda ley de la refracción). Frecuentemente se necesita trazar el camino de un rayo a través de un sistema óptico, el cual generalmente contendrá una sucesión de superficies refractantes y reflejantes separadas por distancias dadas a lo largo del eje óptico. Un procedimiento gráfico aproximado está disponible para trazo de rayos rápido, pero para más precisión es necesario usar un conjunto de fórmulas trigonométricas ejecutadas en sucesión (Kingslake, 1983).

Los rayos en general caen en tres clases (Kingslake, 1983): *meridional*, *paraxial* y *oblicuo*. Los rayos meridionales se encuentran en el plano meridional, el cual es el plano que contiene el eje de la lente y un punto objeto que se encuentra a un lado del eje. Si el punto objeto se encuentra en el eje, todos los rayos son necesariamente meridionales.

Los rayos paraxiales se encuentran en toda su longitud extremadamente cerca al eje óptico. La imagen formada por los rayos paraxiales es considerada a ser *la* imagen, y si cualquier imagen se desvía de la imagen paraxial, esto es considerado como una aberración. Las fórmulas de trazo de rayos paraxial son puramente algebraicas, mientras las fórmulas para trazo de rayos reales involucran funciones trigonométricas. La óptica geométrica (Malacara, 2004)

que considera sólo rayos paraxiales recibe el nombre de óptica de *primer orden* o *gaussiana*.

Los rayos oblicuos, por otro lado, no se encuentran en el plano meridional. En este caso, el rayo no está en un plano común con el eje óptico. Un rayo oblicuo nunca intercepta el eje de la lente.

2.2.3 La región paraxial.

La región paraxial de un sistema óptico es una región en la cual todos los ángulos hechos por los rayos (esto es, los ángulos de inclinación y los ángulos de incidencia y refracción) pueden ser igualados a sus senos y tangentes. En primera instancia este concepto se ve absolutamente inútil, ya que la región es obviamente infinitesimal y aparentemente de valor sólo como un caso límite. Sin embargo, los cálculos del diseño de un sistema óptico basados en relaciones paraxiales son de tremenda utilidad. Su simplicidad hace el cálculo y la manipulación rápido y fácil. Ya que la mayoría de los sistemas ópticos de valor práctico forma buenas imágenes, es claro que la mayoría de los rayos de luz que se originan en un punto objeto deben pasar al menos razonablemente cerca al punto imagen paraxial. Las relaciones paraxiales dan ubicaciones para los puntos imagen, los cuales sirven como una excelente aproximación para las imágenes de un sistema óptico bien corregido.

Paradójicamente, las ecuaciones paraxiales son frecuentemente usadas con ángulos y alturas del rayo relativamente grandes. Esta extensión de la región paraxial es útil en la estimación de los diámetros necesarios de elementos ópticos y en aproximar la calidad de la imagen formada por un sistema de lentes.

Aunque los cálculos paraxiales son frecuentemente usados en el trabajo preliminar en sistemas ópticos y en cálculos aproximados (indebidamente, el término “aproximación paraxial” es frecuentemente usado), se debe tener en cuenta que las ecuaciones paraxiales son perfectamente exactas para la región paraxial, por lo que son usadas en la determinación de la aberración como una base de comparación, para indicar qué tanto un rayo calculado trigonométricamente se desvía de su posición ideal (Smith, 1990).

2.2.4 Trazo de rayos en una superficie esférica.

La superficie esférica refractora es la más común y la más útil en óptica, después de la plana. En una superficie refractora como la que se muestra en la Fig. 2.3 se pueden definir los siguientes parámetros (Malacara, 2004):

- a) Centro de curvatura: es el centro de una esfera imaginaria que contiene a la superficie refractora.
- b) Radio de curvatura: es la distancia de la superficie refractora al centro de curvatura.

- c) Vértice: es un punto sobre la superficie refractora, en el centro de su abertura libre. Esta abertura se supone de forma circular.

- d) Eje óptico: es una línea recta imaginaria que pasa por el vértice y el centro de curvatura.

A una superficie esférica refractora pueden llegar rayos luminosos con muy diversas orientaciones. Según su dirección, los rayos que inciden en una superficie esférica se pueden clasificar, como ya se mencionó, en los siguientes tipos: *meridional*, *paraxial* y *oblicuo*. Las definiciones de cada uno de ellos ya fueron dadas en la sección *Tipos de rayos*.

En seguida se estudiará en detalle los rayos meridionales trazados a través de la superficie esférica mostrada en la Fig. 2.3. En dicha figura un rayo meridional incide en el punto P . El rayo es dirigido hacia el punto A . La normal a la superficie en el punto P es M y el centro de curvatura es C .

Por definición, todos los parámetros, r , L , L' , I , I' , excepto U , U' , son positivos en la Fig. 2.3. De hecho, el radio de curvatura r es positivo si el centro de curvatura está a la derecha del vértice y negativo si está a la izquierda de este; las distancias L y L' son positivas si sus respectivos cruces A o B están a la derecha del vértice y negativas si están a la izquierda; los ángulos U y U' tienen el mismo signo de sus pendientes; los ángulos I e I' son positivos si sus pendientes son mayores, considerando su signo, que la pendiente de la normal M y negativos en caso contrario, y los ángulos I e I'

tienen el mismo signo en una refracción y signo contrario en una reflexión (Malacara, 2004).

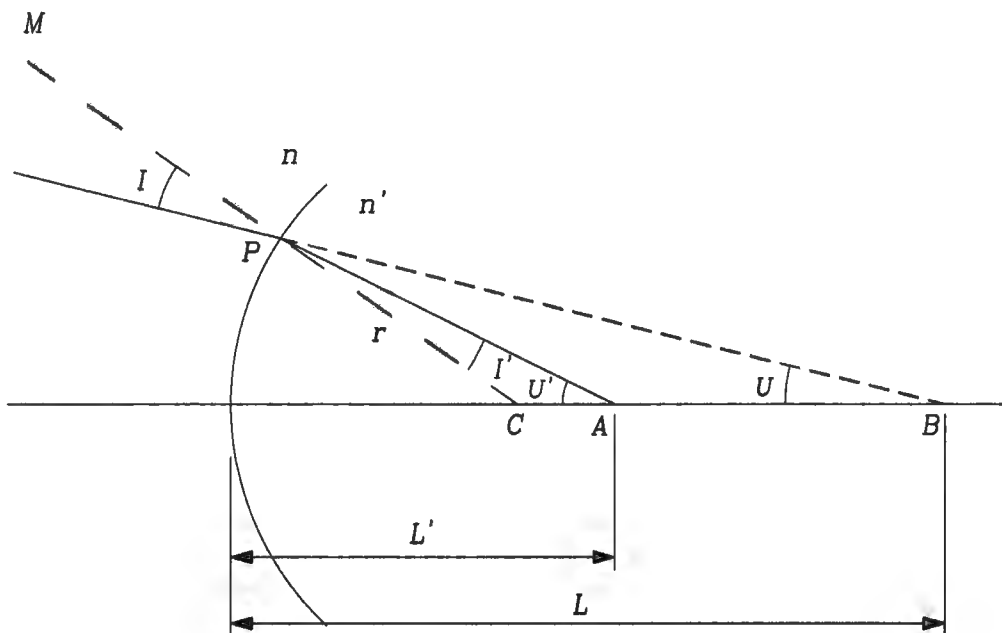


Fig. 2.3 Refracción de un rayo meridional en una superficie que separa dos medios.

Aplicando la ley trigonométrica del seno al triángulo *PCB*:

$$\frac{\text{sen}I}{L-r} = -\frac{\text{sen}U}{r} \tag{2.2}$$

y aplicando la misma ley al triángulo PCA :

$$\frac{\text{sen}I'}{L' - r} = -\frac{\text{sen}U'}{r} \quad (2.3)$$

aplicando ahora una bien conocida relación entre los ángulos de un triángulo al PAB :

$$U - I = U' - I' \quad (2.4)$$

La última relación que se necesita es la ley de Snell:

$$n \text{ sen } I = n' \text{ sen } I' \quad (2.5)$$

En estas cuatro relaciones los parámetros r , n , n' son en general fijos y conocidos, y las cantidades L , L' , I , I' , U , U' variables. Como tenemos cuatro ecuaciones, todas las variables pueden ser calculadas si dos cualquiera de los tres parámetros L , I , U para el rayo incidente son especificados.

La manera más simple de derivar un conjunto de ecuaciones para la región paraxial es reemplazar el ángulo mismo por su seno en las ecuaciones 2.2 a 2.5. De esta manera se obtiene:

$$\frac{i}{l - r} = -\frac{u}{r} \quad (2.6)$$

$$\frac{i'}{l' - r} = -\frac{u'}{r} \quad (2.7)$$

$$u - i = u' - i' \quad (2.8)$$

$$n i = n' i' \quad (2.9)$$

Debe ser notado que las ecuaciones paraxiales se distinguen de las ecuaciones trigonométricas por el uso de letras minúsculas para los valores paraxiales

2.2.5 Stop, pupilas de entrada y salida de un sistema y rayo principal.

La naturaleza intrínsecamente finita de todas las lentes hace que recojan sólo una fracción de la energía emitida por una fuente puntual. Por consiguiente, la limitación física presentada por la periferia de una lente simple determina cuáles son los rayos que entrarán en el sistema óptico para finalmente formar una imagen. Al respecto, el diámetro libre o no obstruido de la lente funciona como una apertura por la cual fluye la energía. Cualquier elemento, sea el borde de la lente o un diafragma separado, como se muestra en la Fig. 2.4, que determine la cantidad de luz que llega a la imagen, se denomina *apertura stop* (Hecht, 2000).

Las pupilas son imágenes de la apertura stop. La *pupila de entrada* de un sistema de lentes es la imagen del stop como se ve desde un punto axial en el objeto a través de aquellos elementos que preceden al diafragma. Si no hay lentes entre el objeto y el stop, éste servirá como pupila de entrada. Por el contrario, la *pupila de salida* es la imagen del stop como se ve desde un punto axial en el plano imagen a través de las lentes interpuestas, si las hay. Si no hay lentes entre la imagen y el stop, éste servirá como pupila de salida (Hecht, 2000).

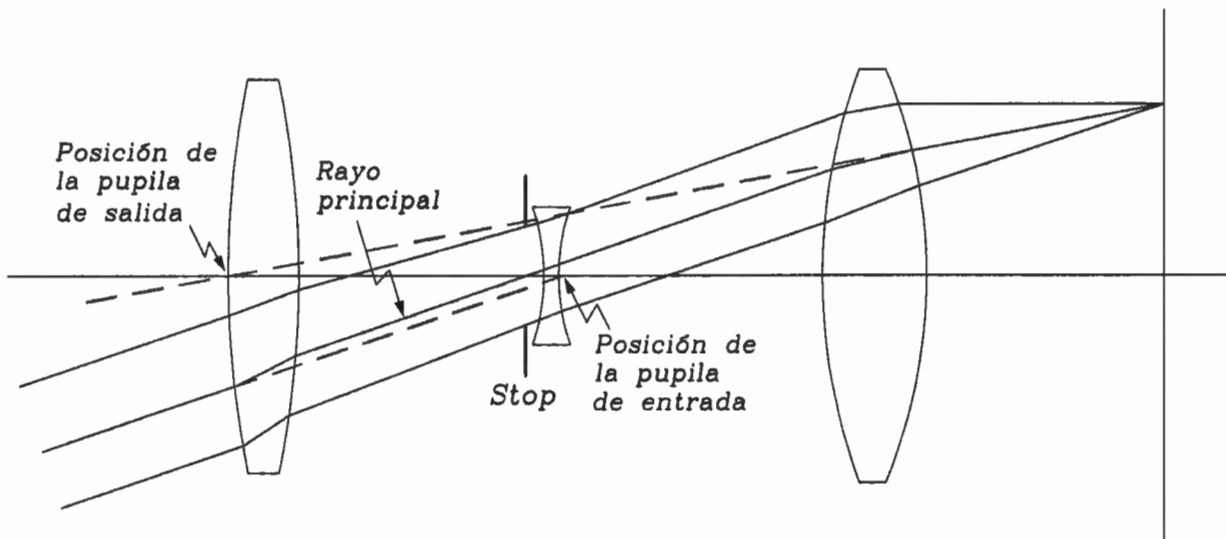


Fig. 2.4 Sistema óptico con el stop al centro.

De entre todos los rayos que parten de un punto fuera de eje en el objeto, hay uno que pasa por el centro del stop (véase Fig. 2.4). A éste se le llama *rayo principal* y hay uno para cada punto fuera del eje del objeto. La

prolongación del rayo principal antes de entrar al sistema óptico pasa por el centro de la pupila de entrada. De manera semejante la prolongación del rayo principal al salir del sistema óptico pasa por el centro de la pupila de salida, como se ve en la Fig. 2.4 (Malacara, 2004).

2.2.6 Viñeta.

Considérese el sistema mostrado en la Fig. 2.5. Para el conjunto axial de rayos, la apertura stop es la apertura libre de la lente A , la pupila de entrada está en A , y la pupila de salida está en la imagen, formada por la lente B , del diámetro de la lente A .

A alguna distancia fuera del eje, sin embargo, la situación es marcadamente diferente. El cono de energía aceptado del punto D está limitado en su orilla más inferior por la orilla más inferior de la lente A y en su orilla más superior por la orilla más superior de la lente B . El tamaño del cono aceptado de energía del punto D es menor que el que sería si el diámetro de la lente A fuera el único medio limitante. Este efecto es llamado *viñeteado*, y causa una reducción en la iluminación en el punto imagen D' .

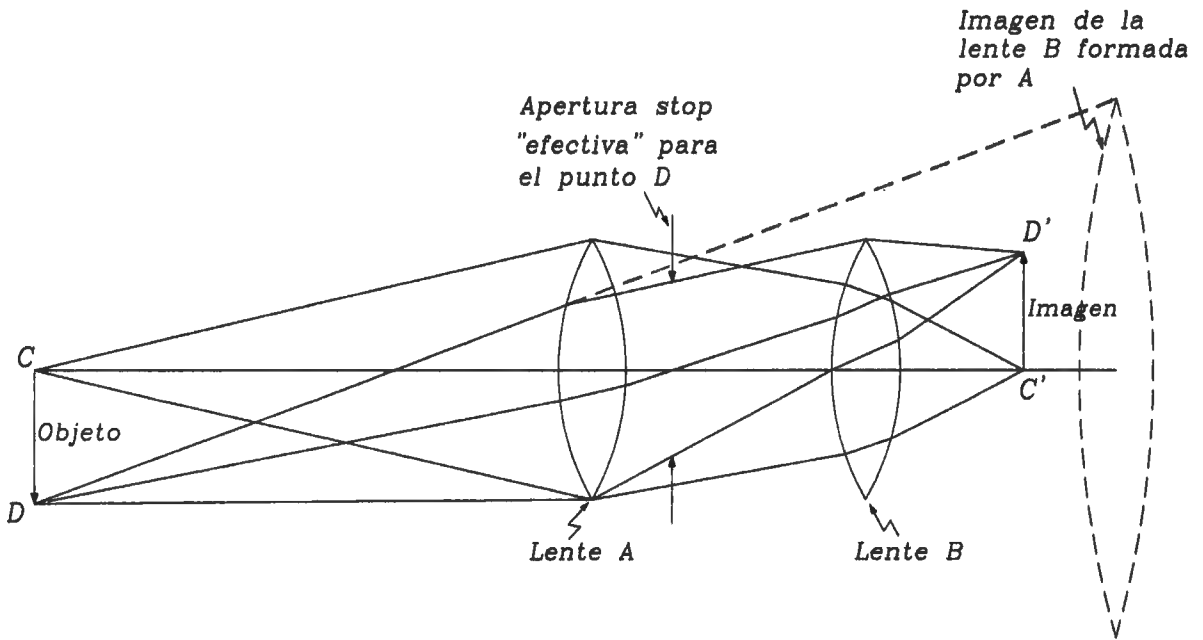


Fig. 2.5 Viñeteado en un sistema de componentes separados. El cono de rayos del punto D está limitado por la orilla más inferior de la lente A y la orilla más superior de B , y es más pequeño que el cono aceptado del punto C . El rayo más superior de D justo pasa a través de la imagen de la lente B la cual es formada por la lente A .

La apariencia del sistema cuando se ve desde un punto D es mostrada en Fig. 2.6. La pupila de entrada ha llegado a ser el área común de dos círculos, uno el diámetro libre de la lente A , y el otro el diámetro de la imagen de la lente B formada por A . Las líneas discontinuas en la Fig. 2.5 indican la ubicación y el tamaño de esta imagen de B , y las flechas indican la apertura stop “efectiva” la cual tiene un tamaño, forma, y posición completamente diferente que para el caso axial.

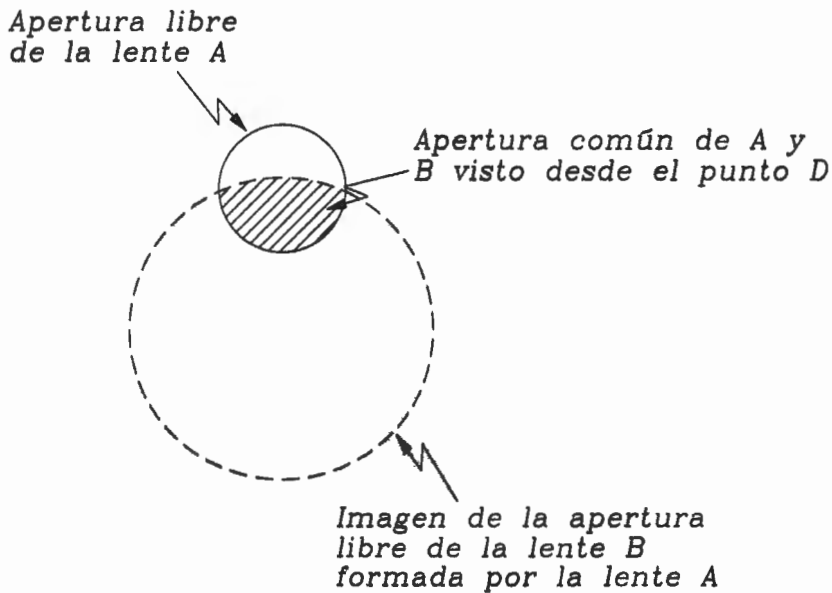


Fig. 2.6 Las aperturas del sistema óptico de la Fig. 2.5 cuando son vistas desde el punto D.

2.3 Teoría de aberraciones.

La imagen formada por los rayos paraxiales es considerada a ser la imagen ideal, y si cualquier imagen se desvía de la imagen paraxial, esto es considerado como una aberración (Kingslake, 1983). Esto es, las aberraciones pueden ser determinadas calculando la ubicación de la imagen paraxial de un punto objeto y luego trazar exactamente un gran número de rayos para determinar qué tanto los rayos se desvían del punto imagen paraxial. Estas aberraciones hacen que la calidad de las imágenes no sea tan buena como es deseable.

2.3.1 Aberraciones de primer orden y alto orden.

El tratamiento paraxial (teoría de primer orden) se basó en la suposición de que el $\text{sen } u$ puede reemplazarse satisfactoriamente sólo por u (Hecht, 2000); es decir, el sistema se restringió hasta operar en una región extremadamente estrecha alrededor del eje óptico. Obviamente si los rayos de la periferia de una lente se incluyen en la formación de una imagen, la afirmación de que $\text{sen } u \approx u$ ya no resulta satisfactoria. Sea como fuere, si los dos primeros términos en el desarrollo

$$\text{sen } \varphi = \varphi - \frac{\varphi^3}{3!} + \frac{\varphi^5}{5!} - \frac{\varphi^7}{7!} + \dots \quad (2.10)$$

se conservan como una aproximación mejorada, se tendrá la *teoría de tercer orden*, con la que se pueden obtener efectos secundarios que no prevé la teoría de primer orden. Las teorías de alto orden incluyen además otros términos de la serie.

La teoría de primer orden predice que un sistema óptico formado por lentes tiene diferentes distancias focales para distintos colores. Estas variaciones están relacionadas con el cambio del índice de refracción con el color. Esta variación de la distancia focal hace que tanto la posición como el tamaño de la imagen sean diferentes para cada color. El cambio en la posición es lo que se conoce como *aberración cromática axial* y el cambio de tamaño

como *aberración cromática lateral*. Estas aberraciones son las únicas que puede predecir la teoría de primer orden y aparecen cuando la luz que ilumina el objeto es blanca (Malacara, 2004).

Aún si la luz es monocromática, aparecen aberraciones que no puede predecir la óptica de primer orden. Si el objeto es puntual, la imagen no necesariamente lo es, debido a la presencia de las aberraciones monocromáticas. Éstas se pueden calcular en forma aproximada con la teoría de tercer orden. Mayor exactitud sólo se puede lograr con aproximaciones de orden superior, considerando más términos en el desarrollo del seno. Otra alternativa para calcularlas con más precisión es hacer el trazo trigonométrico exacto de los rayos a través del sistema .

Las aberraciones monocromáticas se pueden observar tanto cuando la luz que forma la imagen es blanca como cuando es monocromática. A estas aberraciones se les conoce también como *aberraciones de Seidel* y son la cinco siguientes: *esfericidad, coma, astigmatismo, distorsión y curvatura de campo* (Malacara, 2004)..

En seguida se estudiarán con algún detalle cada una de estas aberraciones.

2.3.2 Aberración cromática axial.

Cuando las imágenes roja, amarilla y azul de un objeto que emite estos colores están en planos diferentes, se dice que la lente tiene *aberración cromática longitudinal* o *axial*. Se podría lograr que las imágenes azul y roja coincidieran en un sólo plano, combinando dos o más lentes que tuvieran aberraciones cromáticas opuestas. A tal sistema se le da el calificativo de *acromático*.

El hecho de que las imágenes roja y azul estén en un sólo plano no implica que la imagen amarilla también esté en el mismo plano. Si combinando tres o más lentes se hacen coincidir los tres colores, se tiene un sistema *apocromático*.

El sistema es acromático si los focos rojo y azul coinciden, pero hay que notar que esto implica que las distancias focales son iguales sólo si además los planos principales rojo y azul coinciden (Malacara, 2004).

2.3.3 Aberración cromática de amplificación.

Aun cuando las imágenes roja y azul coincidieran en un solo plano podrían tener diferentes distancias focales y por lo tanto diferentes tamaños. Esto sucedería si los planos principales para el rojo y el azul no coincidieran en un mismo lugar. A este defecto se le llama *aberración cromática lateral* o *de amplificación*. En el caso de un sistema de lentes

delgadas en contacto coinciden los planos principales rojo y azul, y por lo tanto las aberraciones cromáticas lateral y axial son simultáneamente cero. Pero no sucede así en un sistema de lentes separadas (Malacara, 2004).

2.3.4 Aberración de esfericidad.

La aberración de esfericidad es la más importante de las aberraciones de Seidel o monocromáticas, ya que es la única que afecta a todo el campo, incluyendo las cercanías del eje óptico. Su nombre viene del hecho de que esta aberración se produce aun en las superficies perfectamente esféricas, como se muestra en la Fig. 2.7 (a) y (b), para una superficie refractora y una reflectora. Se observa que la posición del foco depende de la altura del rayo sobre la superficie refractora. La envolvente de los rayos refractados forma una curva característica llamada cóustica., como se ve observa en la Fig. 2.7 (b).

La aberración de esfericidad es una desviación de los rayos que produce diversos puntos de convergencia; éstos se pueden observar cuando el objeto es un punto luminoso colocado sobre el eje óptico, lo mismo que la imagen. Tanto una superficie simple como una lente tienen este tipo de aberración (Malacara, 2004).

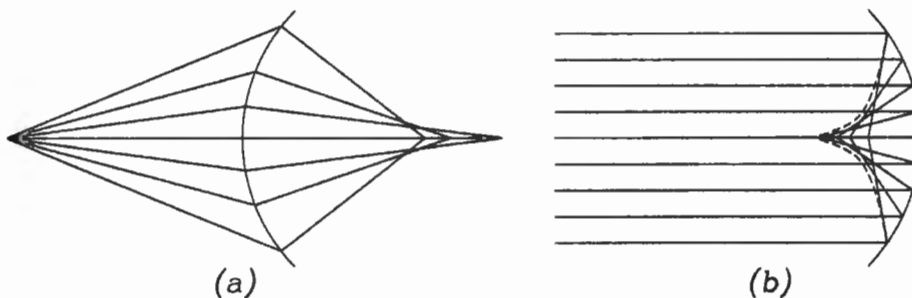


Fig. 2.7 Aberración de esfericidad en una superficie esférica (a) refractora y (b) reflectora

2.3.5 Aberración de coma.

Esta aberración se manifiesta únicamente para puntos fuera del eje óptico. Para entenderla bien es necesario definir antes el concepto de rayos tangenciales y de rayos sagitales. Considerando la Fig. 2.8 supóngase que un objeto puntual se ha desplazado en la dirección vertical. Cualquier rayo que llegue a la pupila de entrada sobre su diámetro vertical es un *rayo tangencial* y cualquier rayo que llegue sobre su diámetro horizontal es un *rayo sagital* (Malacara, 2004).

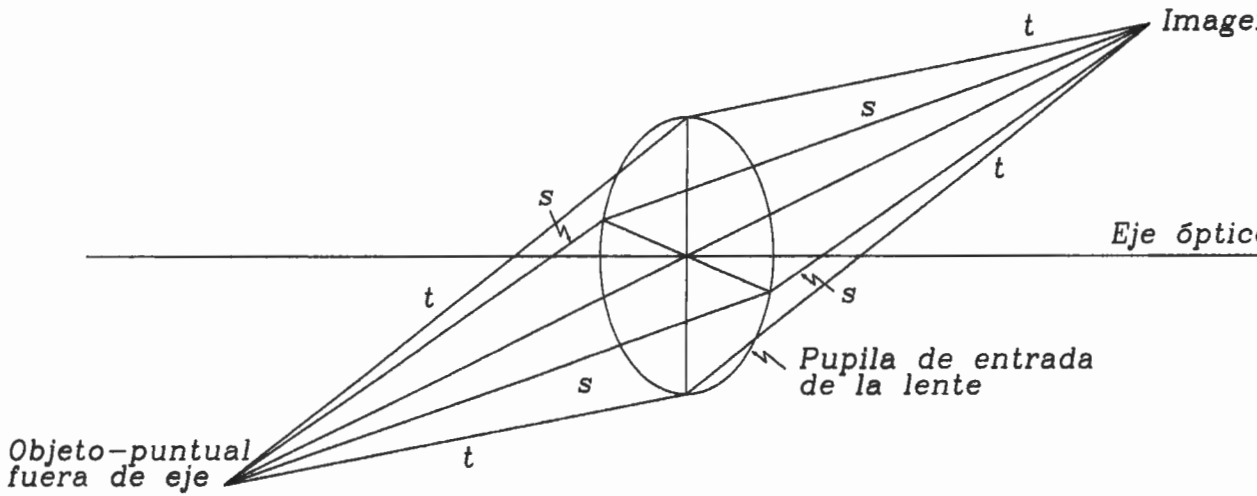


Fig. 2.8 Rayos tangenciales y sagitales en un sistema óptico.

Los rayos tangenciales en la formación de una imagen comática se ilustran en la Fig. 2.9 para una lente simple. La *coma* se debe a que la amplificación paraxial es diferente de la amplificación marginal.

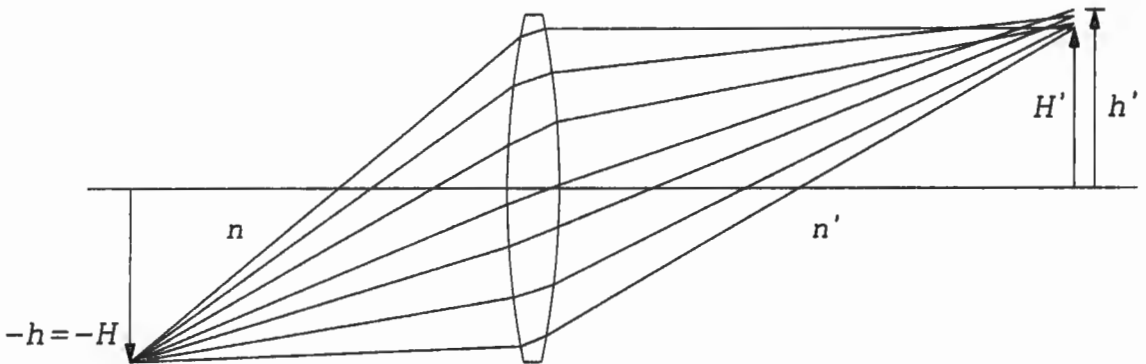


Fig. 2.9 Formación de la imagen comática según Abbe.

La imagen comática se describe en la Fig. 2.10, donde se define la *coma sagital* ($coma_s$) y la *coma tangencial* ($coma_t$). El rayo que pasa a través del centro de la lente A_p tiene la amplificación más alta y va al foco paraxial. Los rayos que pasan por A_1 y A_2 son rayos tangenciales y los rayos que pasan por C_1 y C_2 son rayos sagitales.

Por definición, la coma sagital es la distancia del foco paraxial al foco marginal sagital y la coma tangencial es la distancia del foco paraxial al foco marginal tangencial. Empleando la teoría de tercer orden se puede demostrar que (Malacara, 2004):

$$coma_t = 3 coma_s \quad (2.11)$$

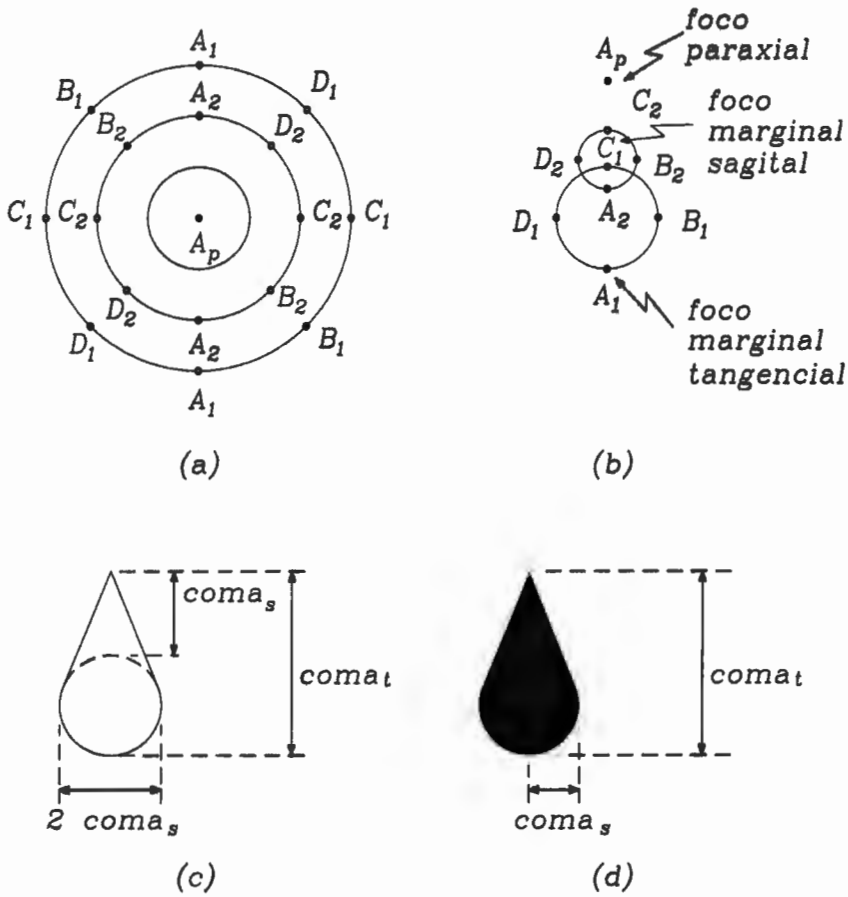


Fig. 2.10 Formación de la imagen comática: (a) distribución de los rayos sobre la pupila de entrada; (b) cruce de los rayos en el plano focal; (c) dimensiones de la $coma_s$ y la $coma_t$; (d) forma final de la imagen comática.

2.3.6 Astigmatismo.

La aberración llamada *astigmatismo*, al igual que la coma, también contribuye a la degradación de la imagen fuera del eje. Esta aberración es la

separación entre el punto de convergencia de los rayos meridionales y el punto de convergencia de los rayos sagitales, como se ilustra en la Fig.2.11.

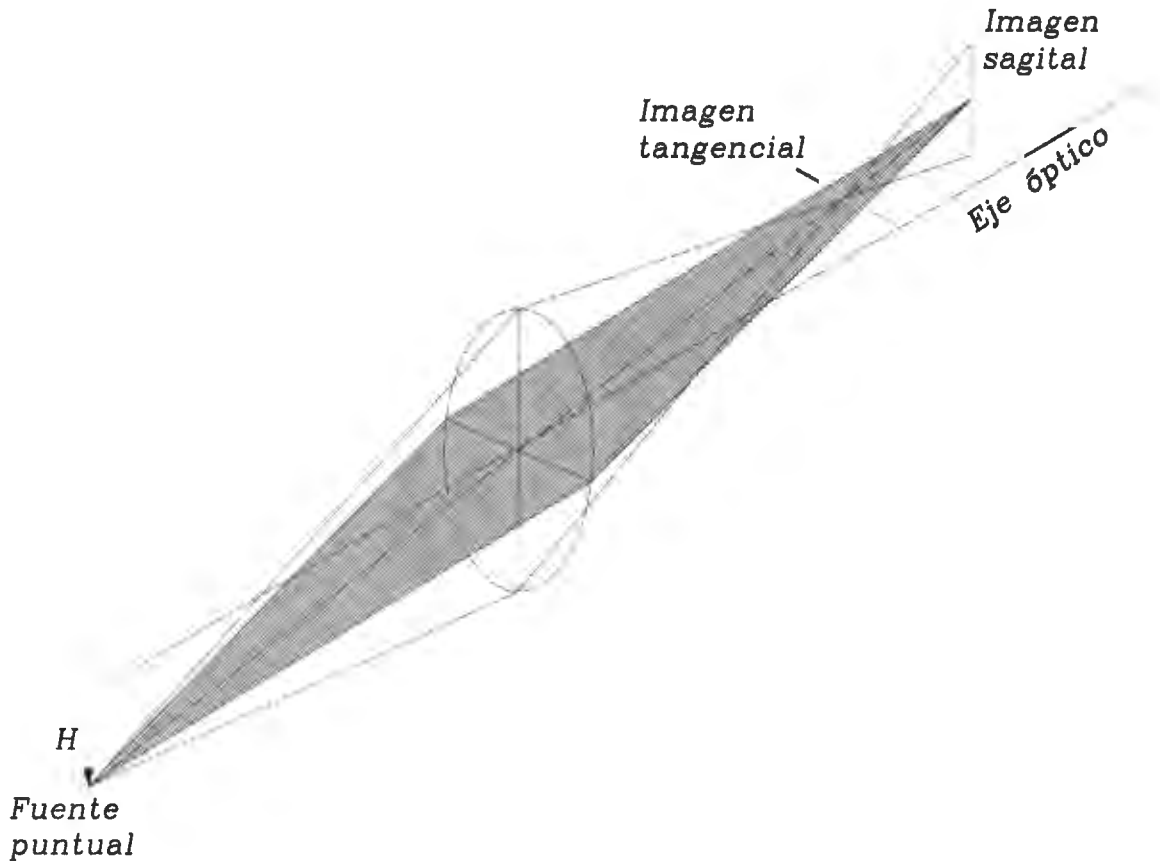


Fig. 2.11 Imagen astigmática, mostrando las posiciones de los focos tangencial y sagital.

Las superficies donde los rayos tangenciales y sagitales están enfocados se llaman superficies tangencial y sagital, respectivamente. Si el campo es pequeño, estas superficies tienen forma aproximadamente esférica, como se ilustra en la Fig. 2.12. Si el astigmatismo de una lente se eliminara de alguna

manera, por ejemplo cambiando de posición la pupila, las dos superficies, tangencial y sagital cambian su curvatura aproximándose a la de Petzval, que permanece estacionaria (Malacara, 2004).

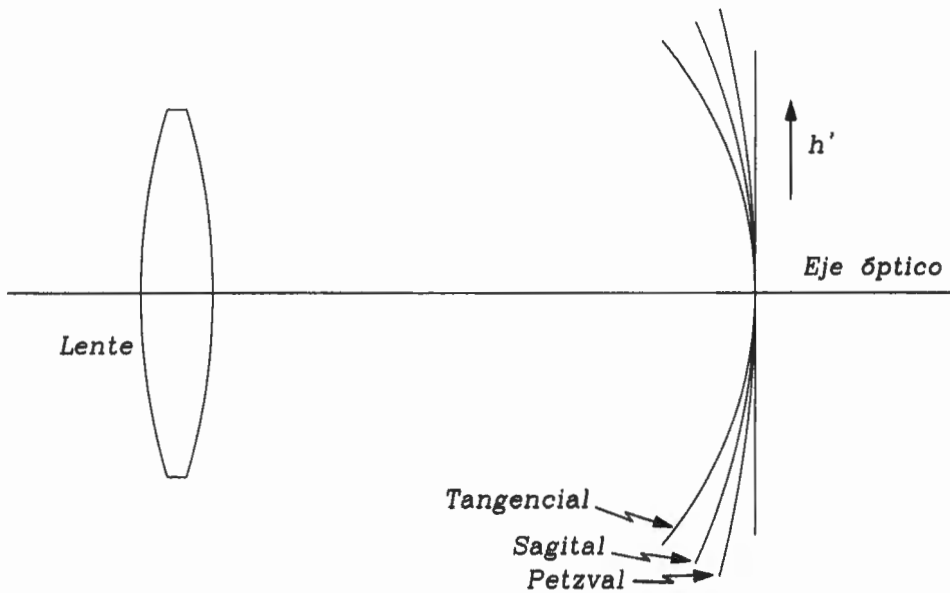


Fig. 2.12 Superficies focales tangencial, sagital y de Petzval, en un sistema óptico.

En el desarrollo de la teoría de tercer orden el astigmatismo se mide tomando como referencia la superficie de Petzval. Así, el astigmatismo longitudinal sagital es la distancia de la superficie sagital a la de Petzval; de manera análoga se define el astigmatismo longitudinal tangencial. De manera alternativa el astigmatismo transversal tanto tangencial como sagital se define como la magnitud de los semiejes de la imagen astigmática elíptica en las direcciones tangencial y sagital, respectivamente, como se ilustra en la Fig.

2.13. Al igual que en el caso de la coma (Ec. 2.11), hay una relación de uno a tres entre los astigmatismos tangencial y sagital (Malacara, 2004):

$$ast_t = 3 ast_s \quad (2.12)$$

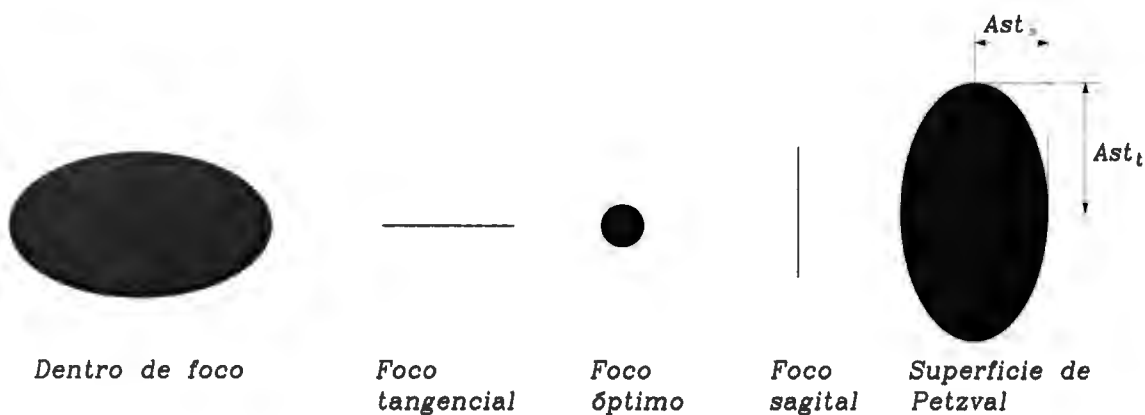


Fig. 2.13 Imagen astigmática en cinco planos focales diferentes.

2.3.7 Curvatura de campo.

Si se forma una imagen de un objeto plano por medio de una superficie refractora o lente, la imagen no será en general plana como el objeto, sino que tendrá por lo común una curvatura. Esta curvatura dependerá de varios factores, pero en un sistema complicado, si se desea, se pueden combinar a fin de que la imagen final sea plana.

2.3.8 Distorsión.

Aún si todos los rayos que parten de un punto en el objeto llegaran a un solo punto en el plano focal, podría existir un tipo más de aberración llamado distorsión. La distorsión puede ser positiva (llamada también de barril) o negativa. Si el objeto es un cuadrado, la imagen tiene forma de barril cuando la distorsión es positiva, o los lados se curvan hacia adentro si la distorsión es negativa, como se muestra en la Fig. 2.14.

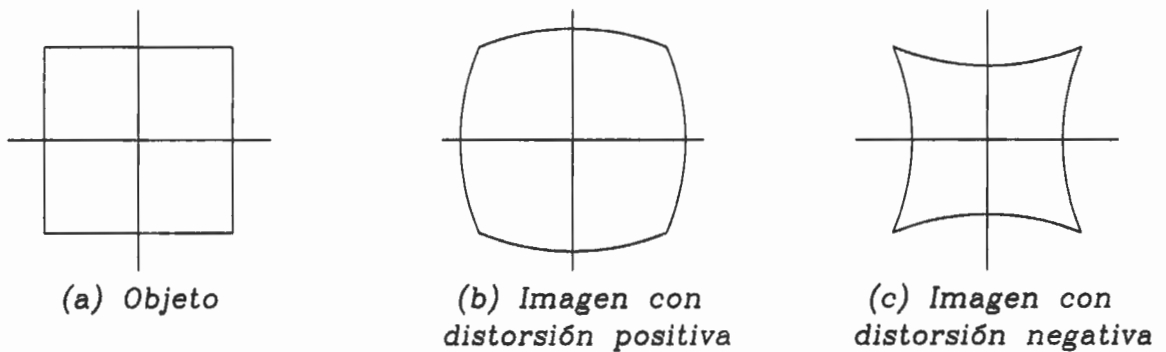


Fig. 2.14 Objeto cuadrado e imágenes con distorsión.

La distorsión se manifiesta como una amplificación m no constante, es decir, que no es la misma para cualquier altura de la imagen. La amplificación disminuye con la altura h' si la distorsión es positiva o aumenta si la distorsión es negativa (Malacara, 2004).

2.4 El ojo humano.

El ojo humano es sin duda el instrumento óptico más importante que existe, y al igual que los instrumentos ópticos diseñados por el hombre, el ojo humano también tiene sus limitaciones (Malacara, 2004). Un conocimiento de las características del ojo humano es importante para la práctica de la ingeniería óptica debido a que la mayoría de los sistemas ópticos utilizan el ojo como el elemento final de una manera u otra. De esta manera, es vital que el diseñador de un sistema óptico entienda lo que el ojo puede y no puede realizar. Por ejemplo, si un sistema óptico visual es requerido para reconocer un cierto tamaño de objeto o para medir a un cierto grado de exactitud, la amplificación de la imagen presentada al ojo debe ser suficiente para permitir al ojo detectar los detalles necesarios. Por otro lado, sería un desperdicio diseñar un sistema con una perfección tal que el ojo no podría utilizar (Smith, 1990).

2.4.1 Constantes ópticas del ojo.

El ojo humano es un órgano casi esférico que mantiene su forma gracias a un recubrimiento esclerótico blanquecino y a la presión de un contenido viscoso.

Como es de esperarse, no hay dimensiones universales para el ojo, por el contrario, se encuentra que hay una considerable variación de sus dimensiones. Se ha definido por razones prácticas un ojo *estándar* como un

ojo con las dimensiones promedio. Las dimensiones y constantes ópticas de este ojo se enlistan en la Cuadro 2.1 (Malacara, 2004).

Cuadro 2.1 *Constantes ópticas del ojo humano promedio.*

Longitud total del ojo (variación común 21-26 mm)	24.75 mm	
Diámetro de la pupila	5-6 mm	
Longitud focal efectiva	22.89 mm	
Potencia total del ojo (relajado)	58.6 dioptrías	
Potencia del cristalino (relajado) (variación común 17-26 D)	19 dioptrías	
Potencia de la córnea	43 dioptrías	
Radio de curvatura de la córnea (variación común 38-48 D)	7.98 mm	
Índice de refracción del humor acuoso	1.336	
Índice de refracción del cristalino	{ centro	1.406
	{ orilla	1.386
Índice de refracción del vítreo	1.337	

2.4.2 Componentes anatómicas del ojo.

El ojo humano está anatómicamente formado por los elementos que se ilustran en la Fig. 2.15. A continuación se dará una breve descripción de los principales elementos anatómicos, con especial referencia a los que intervienen en la formación de la imagen (Malacara, 2004).

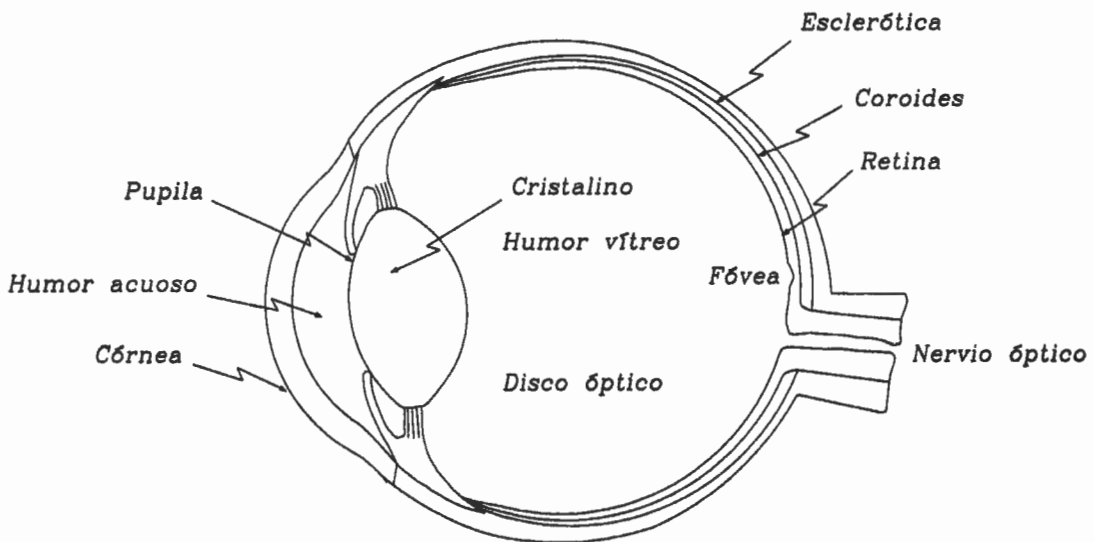


Fig. 2.15 Esquema anatómico del ojo humano.

Córnea.

La cornea es el primer elemento refractor del ojo y contribuye con 43 de las 58 dioptrías que tiene el ojo. Normalmente la cornea es transparente y su poder refractor se debe a su curvatura ya que su índice de refracción es mayor que el del aire.

Pupila.

La pupila es la abertura circular en el centro del iris. El iris es el que da el color a los ojos y recibe su nombre del hecho de que tiene una gran variación en color de una persona a otra. La función de la pupila es controlar la cantidad de luz que llega a la retina, por lo que disminuye su diámetro a medida que se aumenta la intensidad luminosa.

En ojos jóvenes y con baja iluminación el diámetro de la pupila es de alrededor de 8 mm, y cuando la iluminación es muy intensa se cierra hasta un diámetro cercano a 2 mm. Con iluminación promedio, el diámetro de la pupila es de 3.5 a 4 mm. Con la edad, la pupila va disminuyendo su diámetro gradualmente.

Cristalino.

El cristalino es una lente flexible cuya curvatura o poder de convergencia puede ser cambiada a voluntad para enfocar la imagen sobre la

retina. A este proceso se le llama acomodación. La acomodación nos permite enfocar con claridad objetos situados a muy diversas distancias.

El núcleo del cristalino es más denso que la corteza exterior, por lo tanto un índice de refracción mayor. El cristalino tiene un poder refractor de aproximadamente 19 dioptrías y la amplitud de la acomodación varía desde 15 dioptrías en los niños hasta 0.5 dioptrías en ancianos.

Humor vítreo.

El humor vítreo es un gel transparente con índice de refracción ligeramente superior al del agua, que llena el espacio entre el cristalino y la retina.

Retina.

La retina es el elemento sensible del ojo en el cual se forma la imagen. En la retina se transforma la energía luminosa en estímulos nerviosos. La capa más interna de la retina está compuesta de células y fibras nerviosas, mientras que la parte externa, la más sensible a la luz, está cubierta por las células llamadas conos y bastoncillos, además de un pigmento protector.

La entrada del nervio óptico tiene la forma de un disco y no tiene elementos sensibles a la luz.

Cerca del eje óptico se encuentra la fovea. Esta es una pequeña región circular donde la retina se hace más delgada, ya que no existen ahí vasos sanguíneos ni fibras nerviosas. El centro de la fovea contiene solamente conos, mucho más densamente empacados que en el resto de la retina.

La sensibilidad de la retina a la luz depende de la zona estimulada. La fovea es sensible al color y nos permite ver detalles muy finos. Sin embargo, la fovea es muy insensible a bajos niveles luminosos; es por esta razón que una estrella muy débil en el cielo nocturno se distingue con más claridad cuando no se la ve directamente.

Los conos y los bastoncillos son los elementos sensibles a la luz, los cuales tienen propiedades muy diferentes: los bastoncillos contienen rodopsina, la cual es blanqueada por la luz, y los productos que forman estimulan la conducción nerviosa. Los bastoncillos son muy sensibles a intensidades luminosas muy bajas. La visión con los bastoncillos a bajos niveles de iluminación se llama escotópica. Por otro lado, los conos contienen yodopsina y son menos sensibles a la luz que los bastoncillos. La visión con los conos a altos niveles de iluminación se llama fotópica. A niveles medios de iluminación intervienen tanto los bastoncillos como los conos en la llamada visión mesópica.

2.5 Referencias

- Malacara, D., *Óptica Básica*, Fondo de Cultura Económica, México, (2004).
- Hopkins, R. E., Eyepieces, in *Military Standardization Handbook Optical Design, MIL-HDBK 141* (U. S. Defense Supply Agency, Washington, D. C., (1962).
- Kidger, M., *Fundamental Optical Design*, Spie Press, U. S. A., (2002).
- Kingslake, R., *Optical System Design*, Academic Press, Inc., U. S. A., (1983).
- Smith, W., *Modern Optical Engineering*, McGraw-Hill, Inc., U. S. A., (1990).
- Hecht, E., *Óptica*, Addison Wesley Iberoamericana, Madrid, (2000).

Capítulo 3

Corrección de la Aberración de Keystone en Proyectores de Acetatos

3.1 Introducción

En esta sección se hará una breve descripción del funcionamiento y configuración de un proyector de acetatos convencional y de la aberración conocida como aberración de keystone, que se presenta en estos instrumentos cuando el espejo que forma parte de la configuración de dicho proyector, como se verá más adelante, es inclinado para subir la imagen sobre la pantalla y de esta manera sea más visible para la audiencia (Kingslake, 1983). Se analizan las causas ópticas que producen dicha aberración y se muestran las modificaciones propuestas a la configuración del proyector para corregirla, el ensamble final, así como los resultados satisfactorios de la simulación del diseño modificado, obtenidos mediante el programa “*Oslo*” de diseño óptico.

3.2 Proyector de acetatos convencional

El proyector de acetatos es en esencia un proyector de transparencias, donde la transparencia es muy grande, del orden de 30 X 30 cm, y sobre la

cual se puede escribir mientras se proyecta (Malacara, 1989). La Fig. 3.1 muestra la configuración de un típico proyector de acetatos.

El proyector de acetatos consta de una fuente de luz, cuya imagen es proyectada sobre la pupila de entrada de la lente proyectora por medio de unas lentes condensadoras (lentes de Fresnel). Una lente de Fresnel, como se ilustra en la misma Fig. 3.1, es una lente en que la superficie esférica se ha comprimido por secciones anulares, a fin de hacerla de grueso promedio constante. La fuente de luz tiene un filamento muy pequeño y su imagen proyectada sobre la pupila de entrada de la lente proyectora es muy diminuta también. Con esto se logra que la abertura efectiva de la lente proyectora sea pequeña, haciendo la aberración de esfericidad y la cromática axial poco notorias. La coma, la distorsión y la aberración cromática de amplificación se reducen a un valor muy pequeño gracias a que la lente proyectora, la cual forma sobre la pantalla una imagen real de la transparencia, tiene una configuración casi simétrica, pues es del tipo que se muestra en la Fig. 3.2. Arriba de la lente proyectora está un espejo a 45° (Fig. 3.1), para proyectar la imagen sobre una pantalla vertical.

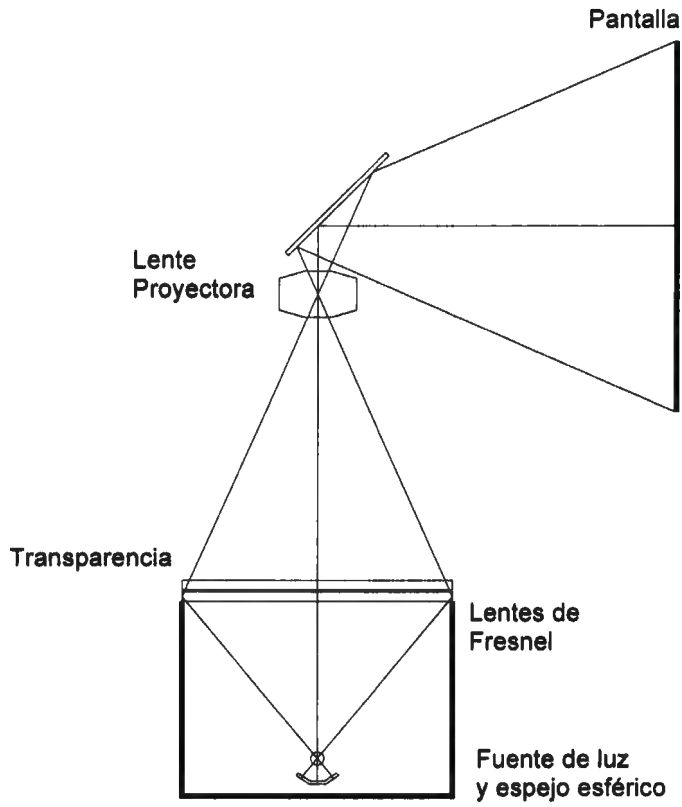


Fig. 3.1 Típico proyector de acetatos

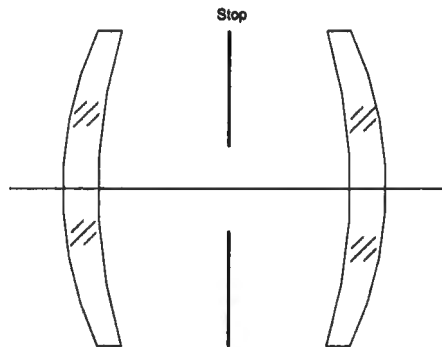


Fig. 3.2 Lente proyectora del proyector de acetatos.

3.3 Aberración de keystone

Si el espejo del proyector de acetatos es inclinado, para subir la imagen sobre la pantalla y de esta manera sea más visible para la audiencia, la imagen sufre una aberración conocida como aberración de keystone (Kingslake, 1983), como se ilustra en la Fig. 3.3. Debido a la presencia de esta distorsión la orilla superior de la imagen cuadrada proyectada es más grande que la orilla inferior, como se muestra en la Fig. 3.3. Esta forma de distorsión es comúnmente vista cuando se usa un proyector de acetatos, y la mayoría de la gente lo acepta como inevitable. El objetivo es sugerir una modificación del sistema proyector de acetatos para eliminar esta distorsión de la imagen.

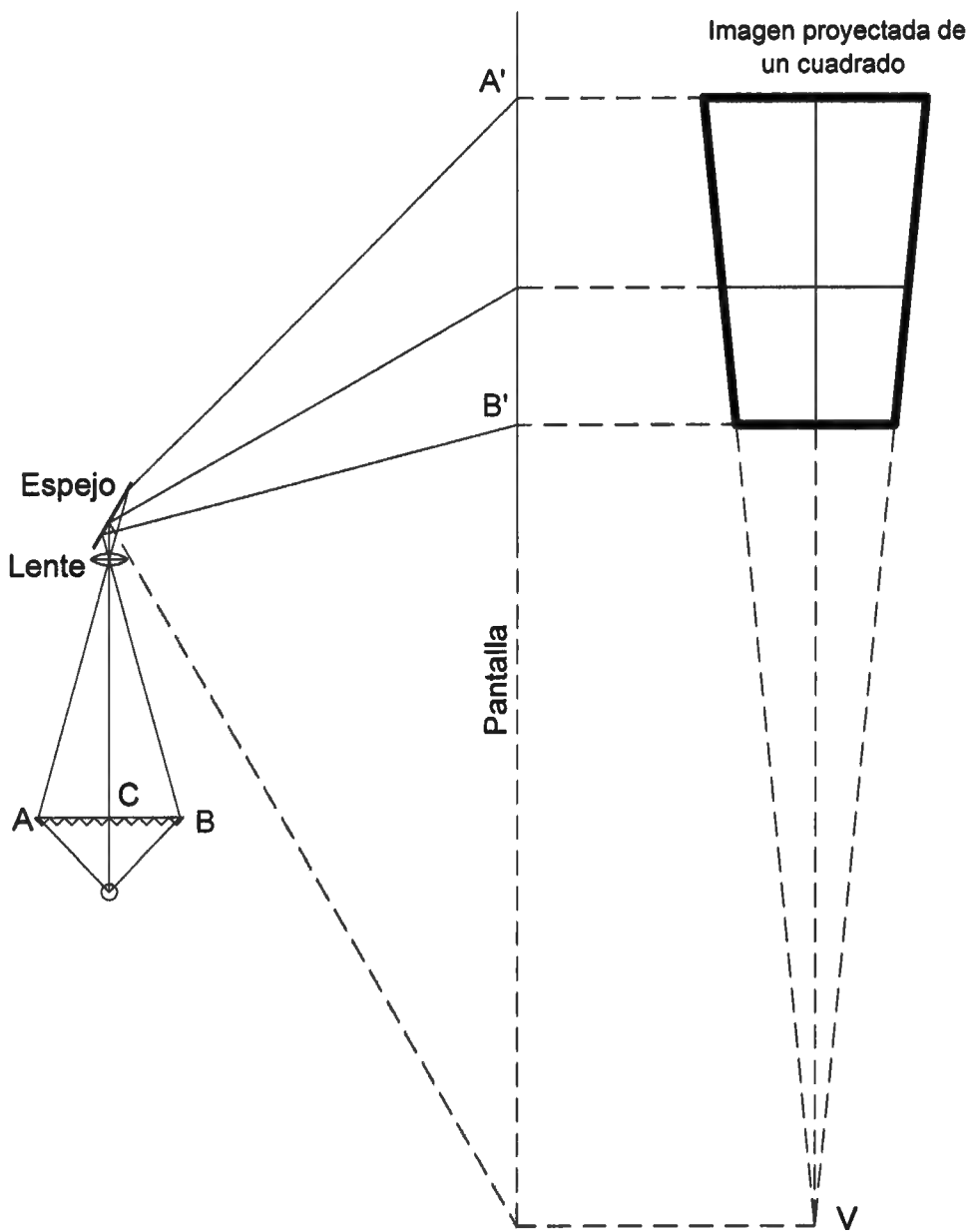


Fig. 3.3 Aberración de keystone en un proyector de acetatos.

La aberración de keystone en un sistema óptico ocurre cuando la amplificación lateral es diferente para las orillas superior e inferior de la imagen. Esta situación ocurre si el plano imagen no es perpendicular sino inclinado con respecto al eje óptico, como se muestra en la Fig. 3.4 (a). Un segundo problema debido a esta inclinación del plano imagen es que la imagen cambia su enfoque linealmente de su orilla más inferior a la más superior. La imagen puede ser nítidamente enfocada solamente para una franja horizontal.

Esta distorsión de keystone puede ser compensada si el plano objeto es también inclinado hasta que la imagen y el objeto sean paralelos uno con respecto a otro, como en la Fig. 3.4 (b). El problema con esta solución es que el desenfocamiento lineal en la imagen es incrementado aún más. Ha sido mostrado en algunos libros de óptica (Kingslake, 1965) que una imagen idealmente plana e inclinada producida por una lente delgada está enfocada sobre el plano completo solamente si los planos objeto e imagen y el plano de la lente delgada se cruzan en una línea común, como se muestra en la Fig. 3.4 (c). Para el caso de un sistema de lente gruesa, las líneas de intersección para los planos objeto e imagen con los correspondientes planos principales deben tener la misma altura (Malacara, 2004).

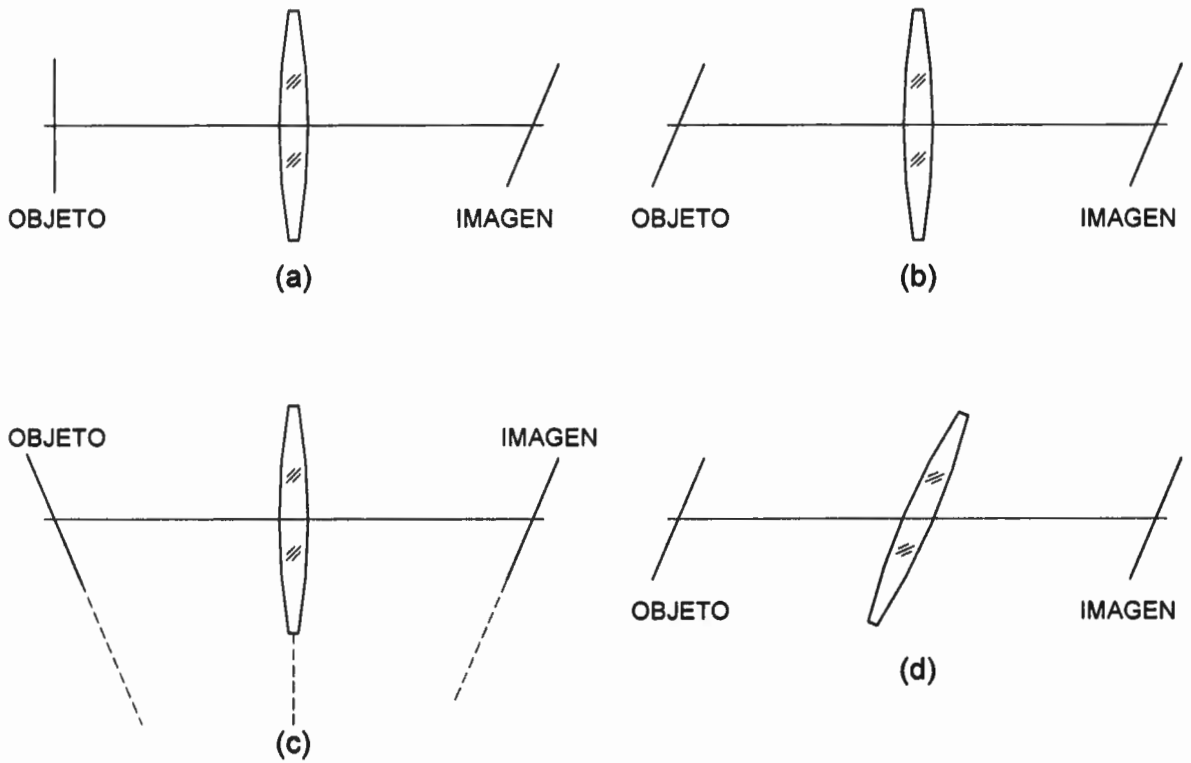


Fig. 3.4 Inclinación de los planos objeto e imagen: a) Inclinación del plano imagen, b) inclinación de los planos objeto e imagen para hacerlos paralelos entre ellos, c) los planos objeto e imagen y el plano de la lente intersecan en una línea común, d) los tres planos son paralelos entre ellos.

Se ve claramente que la inclinación requerida del plano objeto para eliminar la distorsión de keystone es en el sentido opuesto al que se requirió para enfocar la imagen sobre el plano imagen completo. Una solución alternativa para eliminar tanto la distorsión de keystone como el desenfocamiento lineal es hacer el sistema con los planos objeto e imagen paralelos entre ellos y a la lente como en la Fig. 3.4 (d).

3.4 Proyector de acetatos.

El arreglo de la Fig. 3.4 (d) puede ser usado en el proyector de acetatos mostrado en la Fig. 3.1, si la lente proyectora es desplazada sin ninguna inclinación hacia la orilla inferior del plano objeto. Entonces la orilla inferior de la imagen proyectada debe estar a la altura del centro de la lente proyectora, como se muestra en los esquemas desplegado y plegado (con un espejo plano) en la Fig. 3.5 (a) y 3.5 (b) respectivamente. Un problema con este arreglo es que o la lámpara de iluminación debe también ser desplazada o las lentes condensadoras de Fresnel deben ser hechas con un componente prismático, haciéndolas lentes fuera de eje. Ambas soluciones introducen aberraciones fuera de eje como coma y astigmatismo en este condensador en la imagen de la lámpara proyectada sobre la pupila de entrada de la lente proyectora. Una solución alternativa más sencilla es inclinar el condensador de Fresnel como se ilustra en la Fig. 3.5. Una clara ventaja de esta configuración es que cualquier proyector de acetatos existente puede ser modificado de esta manera construyendo una nueva lente proyectora. Esto es, a fin de modificar un proyector de acetatos existente para eliminar la

distorsión de keystone, el condensador de Fresnel debe ser inclinado y una nueva lente proyectora debe ser suministrada. Debe de ser notado que la lente proyectora ahora tiene un objeto con un tamaño efectivo con casi dos veces el diámetro angular previo. Por lo tanto, la lente proyectora debe ser diseñada para un campo más grande.

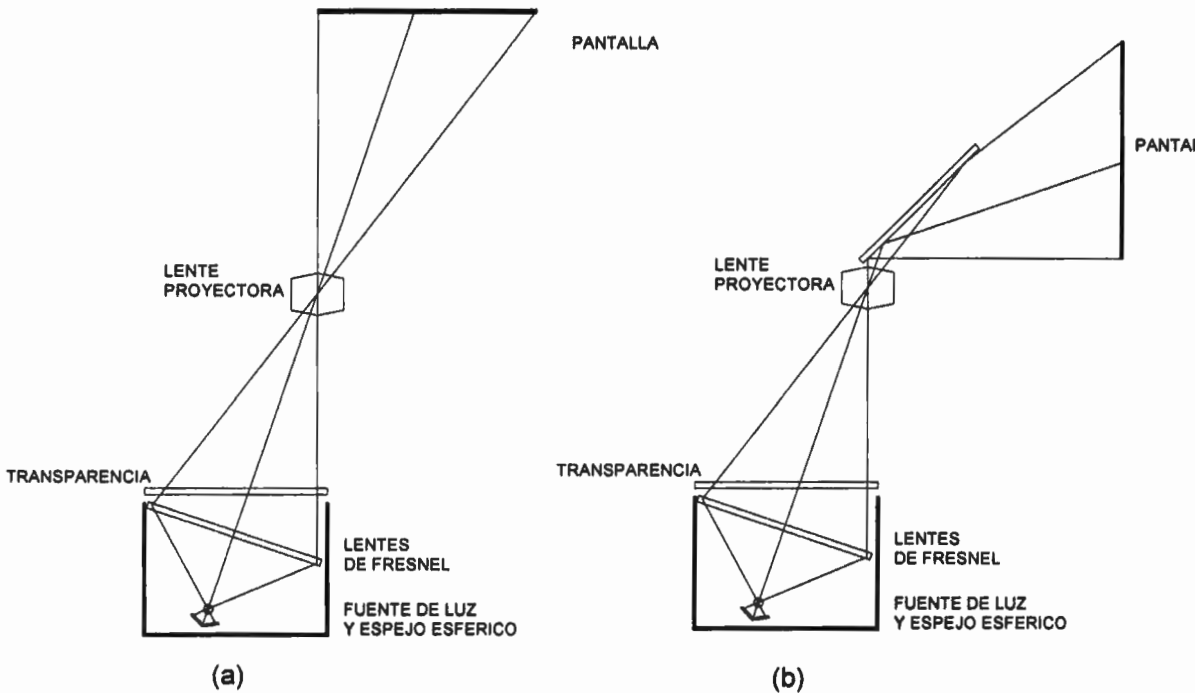


Fig. 3.5 (a) Arreglo desplegado del proyector de acetatos e (b) esquema final usando un espejo plano en la parte superior de la lente proyectora.

3.5 Diseño del sistema óptico.

La lente proyectora debe proyectar la imagen de un objeto plano con casi dos veces el tamaño del objeto real. En un proyector de acetatos común, el objeto a ser proyectado es colocado en un cuadro iluminado con dimensiones de 255 x 255 mm. Una imagen es proyectada con un tamaño angular de $40^\circ \times 40^\circ$, y la más grande distancia fuera de eje en el objeto es aproximadamente 156 mm, como se muestra en la Fig. 3.6. Esto significa que el sistema óptico que aquí se propone debe producir una buena imagen con casi dos veces este tamaño. Un típico proyector de acetatos comercial tiene un diseño de lente como en la Fig. 3.7 y Tabla 3.1. En la orilla del campo el tamaño del radio de la mancha es de aproximadamente 1 minuto de arco en la dirección tangencial y aproximadamente 10 minutos de arco en la dirección sagital, lo cual es cercano a la resolución angular normal del ojo como se muestra en el diagrama de manchas para la luz verde en la Fig. 3.8. Por simplificación, una práctica común en la evaluación del diseño óptico y programas de diseño es poner la lente con su conjugado más grande siendo el objeto y el más corto siendo la imagen. Siguiendo esta práctica, el objeto y la imagen fueron intercambiados en el diseño, asumiendo que el objeto es colocado en el plano imagen y viceversa.

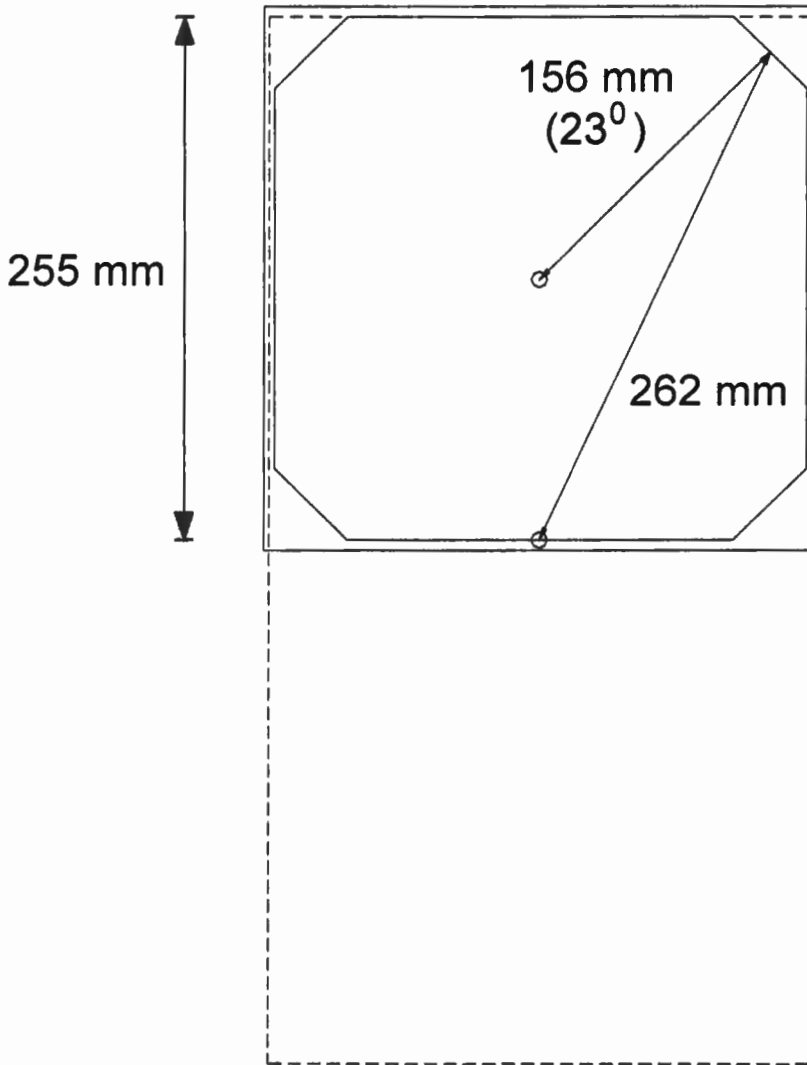


Fig. 3.6 Dimensiones del objeto cuadrado normalmente usado en un proyector de acetatos.

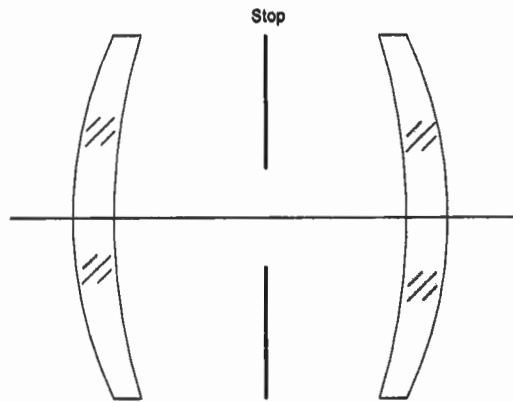


Fig. 3.7 Lente comercial típica para un proyector de acetatos.

Superficie	Radio de Curvatura (mm)	Separación o Espesor (mm)	Medio
Objeto	Infinito	Infinito	Aire
1	104.766	7.2	BK7
2	148.367	60	Aire
Stop	Plano	60	Aire
4	-148.367	7.2	BK7
5	-104.766	294.786	Aire
Imagen	Plano		
Diámetro de la pupila de entrada: 10.0		Distancia focal efectiva: 370.00	
Campo angular del semi-diámetro: 23°		Distancia focal posterior: 294.79	

Tabla 3.1.- Diseño de una lente proyectora de un proyector de acetatos comercial.

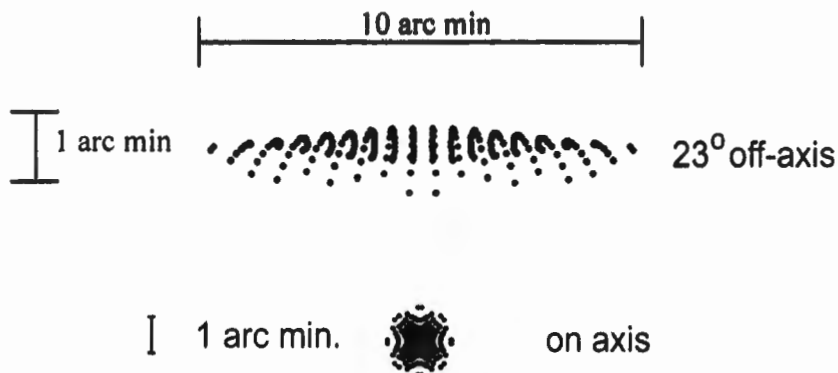


Fig. 3.8 Diagrama de manchas para la típica lente comercial mostrada en la Fig. 3.7.

El proyector de acetatos propuesto para eliminar la distorsión de keystone debe formar la imagen de un objeto con un máximo desplazamiento fuera de eje de aproximadamente 262.00 mm como se muestra en la Fig. 3.6. Se coloca este punto objeto para estar en la imagen a un ángulo de 30° del eje óptico, obteniendo una distancia focal de 454.00 mm.

El diseño de la lente propuesta ha sido logrado incrementando ligeramente los diámetros de las lentes y curvándolas apropiadamente para minimizar el tamaño de la mancha. El diseño final está en la Fig. 3.9 y Tabla 3.2. Vemos que el precio de eliminar la distorsión de keystone ha sido incrementar el tamaño promedio de la mancha de la imagen en la orilla del campo a 6 min de arco, cuando la imagen es observada de la posición del

proyector como se muestra en el diagrama de manchas para la luz verde en la Fig. 3.10. Esta calidad de imagen es aún aceptable ya que la imagen es normalmente observada de una distancia más grande que la separación del proyector a la pantalla. La mejor calidad de imagen es en la porción más baja de la imagen proyectada. La configuración final de la lente con su espejo plano deflectante en la parte superior de la lente se muestra en la Fig. 3.11. La distancia focal del proyector modificado ha sido hecha ligeramente más grande a fin de reducir la amplificación a niveles más comunes que son compatibles con los nuevos proyectores de computadora.

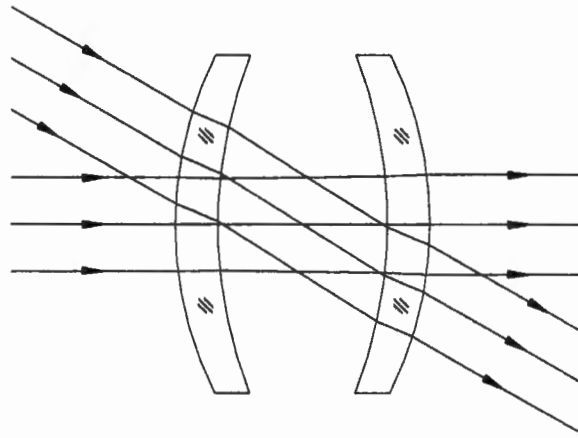


Fig. 3.9 Lente diseñada para el proyector de acetatos.

Superficie	Radio de Curvatura (mm)	Separación o Espesor (mm)	Medio
Objeto	Infinito	Infinito	Aire
1	90	10	BK7
2	109.63	20	Aire
Stop	Plano	20	Aire
4	-109.63	10	BK7
5	-90	412.743	Aire
Imagen	Plano		
Diámetro de la pupila de entrada: 10.0		Distancia focal efectiva: 454.00	
Campo angular del semi-diámetro: 30°		Distancia focal posterior: 412.74	

Tabla 3.2.- Diseño en el proyector de acetatos para eliminar la distorsión de keystone.

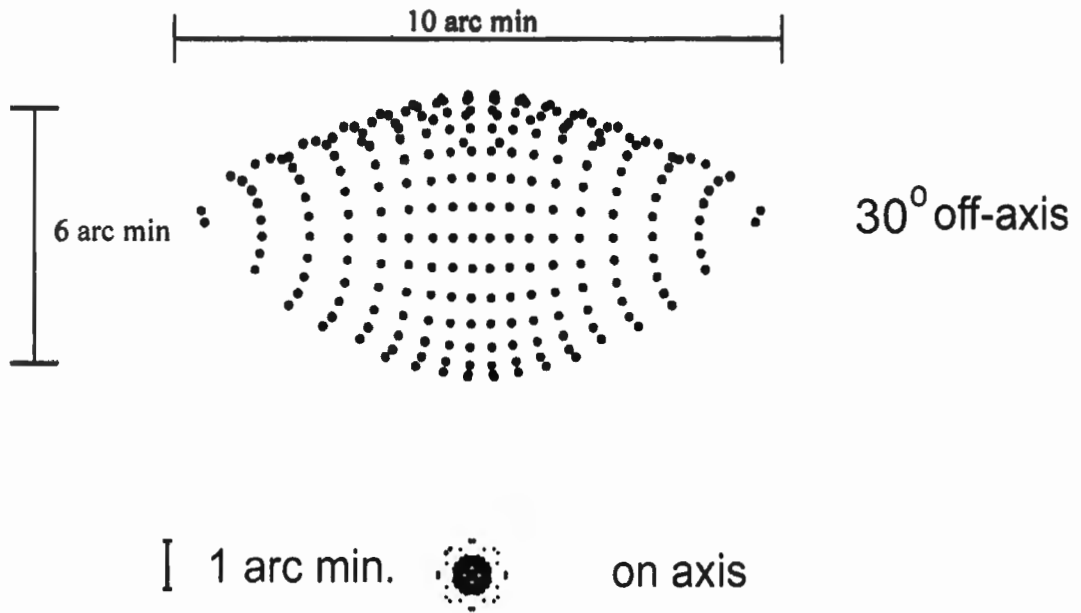


Fig. 3.10 Diagrama de manchas para la lente diseñada mostrada en la Fig. 3.9.

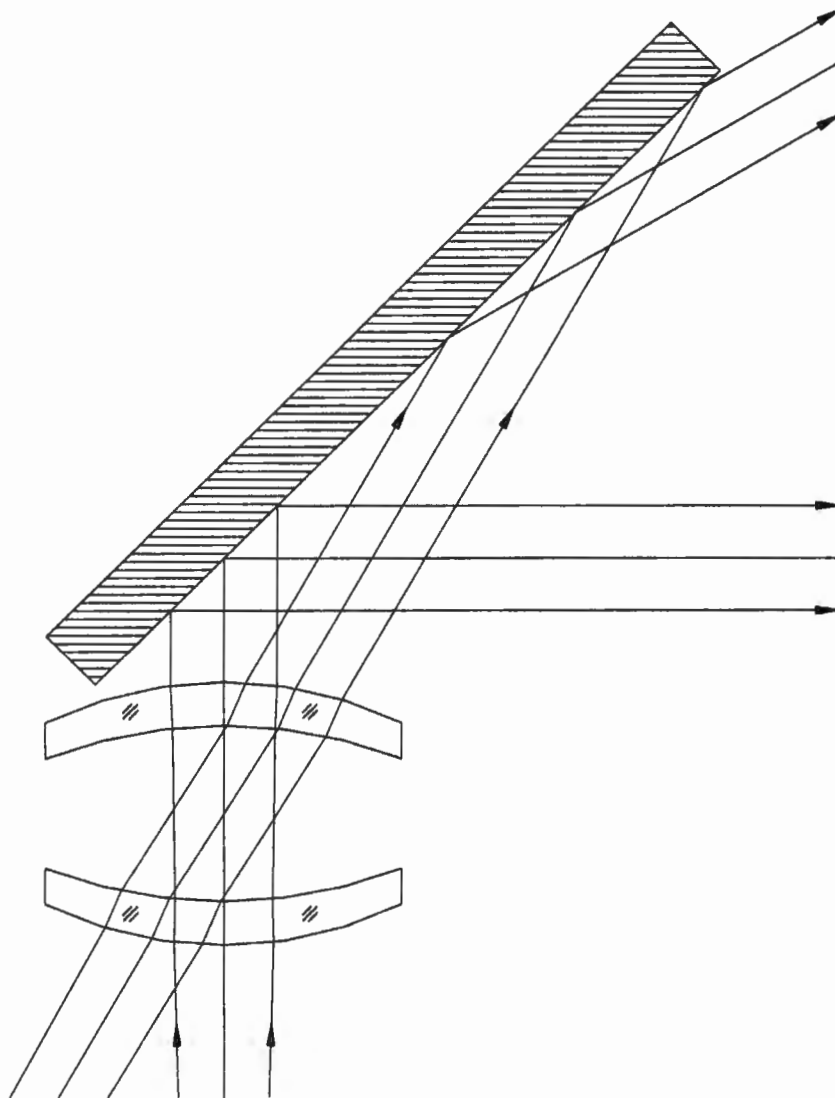


Fig. 3.11 Configuración de la lente con el espejo plano deflectante.

Este proyector de acetatos modificado fue probado usando una lámpara proyectora con un filamento de tungsteno relativamente pequeño y un espejo esférico detrás de ella. Este tamaño pequeño es necesario para que el diámetro efectivo de la pupila de la lente proyectora permanezca pequeño, ligeramente más grande que diez mm, de tal manera que las aberraciones esférica y cromática axial permanezcan suficientemente pequeñas y aceptables. La definición de la imagen, como se esperaba, fue satisfactoria pero empeorada un poco para zonas más altas en la imagen proyectada. En el proyector que se ensambló no hay distorsión de keystone.

3.6 Conclusiones.

Se diseñó un proyector de acetatos sin la presencia de aberración de keystone, sin ningún desenfocamiento de la imagen y con una razonable calidad de la imagen. Cualquier proyector de acetatos puede ser modificado de la manera que aquí se propone.

3.7 Referencias.

Kingslake, R., *Optical System Design*, Academic Press, Inc, Florida, pp. 135-137, (1983).

Kingslake, R., "Basic geometrical optics," in *Applied Optics and Optical Engineering*, R. Kingslake, ed., Academic, New York, v. 1, Chap. 6, pp. 211-212, (1965).

Malacara, D. and Z. Malacara, *Handbook of Optical Design*, Marcel Dekker, New York, p. 56, (2004).

Capítulo 4

Algunas Consideraciones Respecto a la Ubicación de la Pupila de Salida en Algunos Sistemas Visuales

4.1 Introducción.

La localización apropiada del ojo con respecto a un instrumento óptico visual no es un problema trivial. Depende de muchos factores prácticos no conocidos ampliamente. Aquí, se describen algunos de los muchos factores que determinan la mejor posición para la pupila del ojo del observador con respecto al sistema óptico el cual no es necesariamente la pupila de salida del sistema; por lo que, en base a esos factores, se describen algunas de las posibilidades para la mejor ubicación de la pupila del ojo en instrumentos ópticos visuales. Las consecuencias prácticas de este problema son muy importantes para el diseño de sistemas visuales.

La imagen final en un instrumento visual es formada en la retina del ojo. Si el ojo es emétrepe, eso es, si no tiene errores refractivos, la imagen virtual dada por el instrumento debe estar localizada en una distancia infinita (Hecht, 2000), para que pueda ser vista cómodamente por un ojo relajado. El acoplamiento del instrumento visual al ojo es hecho colocando el ojo cerca de la pupila de salida del instrumento. La pupila de salida es la imagen de la

apertura stop como se ve desde un punto axial en el plano imagen a través de las lentes interpuestas, si las hay. La distancia de la última superficie óptica del sistema a la pupila de salida es llamada el *eye relief*. Es frecuentemente asumido en la mayoría de los libros de diseño óptico (Smith, 1979) que la pupila de salida de un sistema óptico visual debe estar localizada en la pupila de entrada del ojo del observador.

Ha sido señalado que la selección de la posición apropiada para el ojo es bastante importante en cascos de despliegue binocular, como el mostrado en la Fig. 4.1, ya que esta posición puede afectar la profundidad estimada del objeto observado (Vaissie, 1999; Vaissie, 2000). Aquí se establece, que en dichos cascos de despliegue binocular, la exactitud de la profundidad incluye la correcta especificación de las pupilas de salida, de las cuales un par estereoscópico de imágenes es dado. La posición de la pupila de salida dependerá de si el rastreo ocular (seguimiento de la rotación de los globos oculares) de los cascos está activado o no. Cuando el rastreo ocular no está activado, la mejor posición para la ubicación de la pupila de salida que minimice los errores de profundidad, es el centro del globo ocular. Si el rastreo ocular está activado la mejor posición de la pupila de salida para minimizar los errores de profundidad sobre todo el campo de vista es la pupila del ojo.

Sin embargo, la consideración anterior no es la única a ser hecha respecto a la posición de la pupila de salida como se describe ahí. Muchos otros factores deben ser considerados.

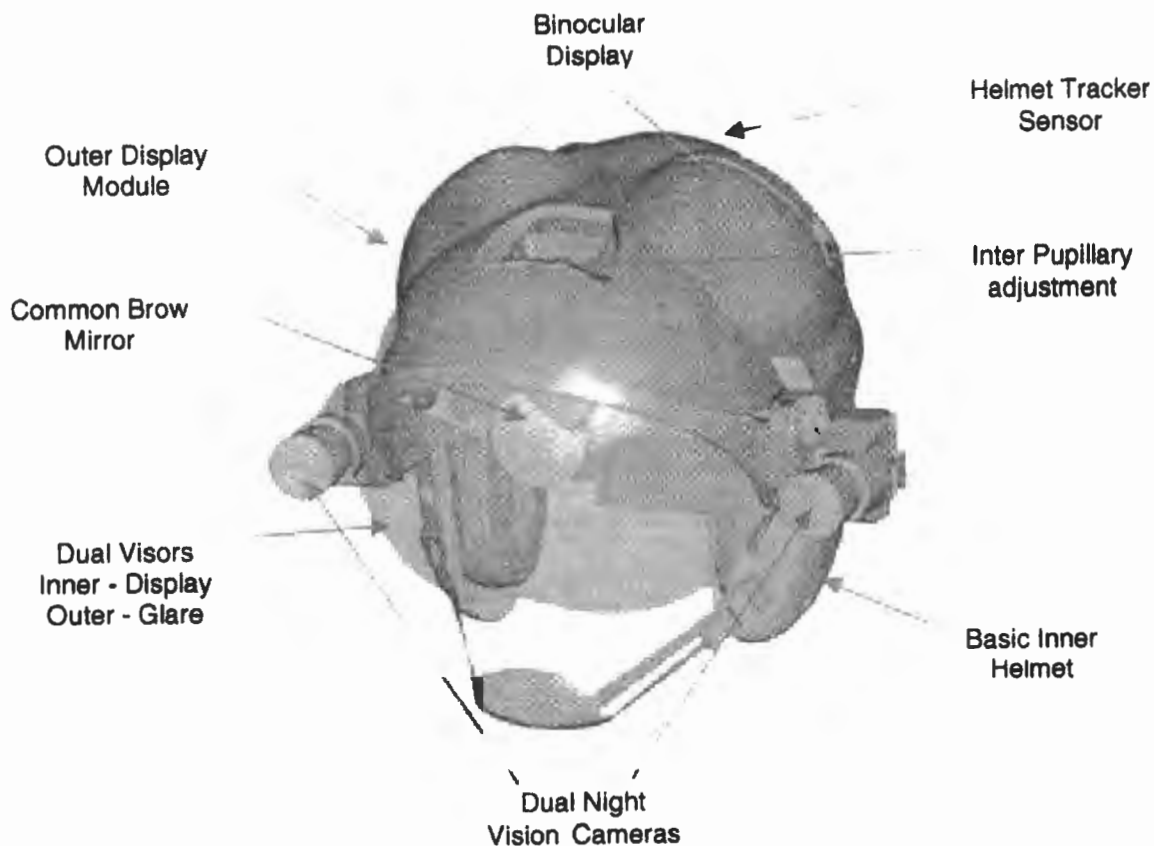


Fig. 4.1 Casco de despliegue binocular.

4.2 Algunas consideraciones respecto a la posición ideal de la pupila del observador.

Es un hecho poco conocido que la mejor posición para la pupila del observador con respecto al sistema óptico no es siempre la pupila de salida del

sistema. La ubicación óptima de la pupila tiene varias soluciones dependiendo de varios factores y circunstancias. Las consecuencias prácticas en la selección de su ubicación son muy importantes para el diseño de sistemas visuales.

Cuando se diseñan instrumentos visuales se pueden encontrar tres situaciones diferentes:

- a) La pupila de salida es una imagen real del stop, localizada a la salida del sistema óptico. En muchos instrumentos, como en telescopios Keplerianos y periscopios el stop está en la pupila de entrada del sistema, el cual es la apertura de la primera lente en el sistema. En estos casos la posición de la pupila de salida y su diámetro están bien definidos.

- b) En algunos otros sistemas, como en lentes oftálmicas, amplificadores y telescopios Galileanos con un diámetro de objetivo grande, como se muestra en la Fig. 4.2, el stop y la posición de la pupila de salida del sistema están en la pupila del ojo del observador. Ya que el ojo rota en su cuenca para observar puntos fuera de eje, el stop del sistema frecuentemente debe moverse fuera de eje. Por lo tanto una posición efectiva a considerar para el stop es el centro de rotación del globo ocular. En estos sistemas la pupila de salida del sistema está ubicada dondequiera que el centro de rotación del globo ocular del observador es colocado. Esta posición será llamada el stop aparente.

Nuestra justificación para esto es que en el stop aparente todos los rayos principales fuera de eje cruzan el centro del stop aparente, el cual es igual al diámetro de la pupila del ojo dividido entre el coseno del ángulo de visión periférica (ver Fig. 4.3), es decir

$$D_s = \frac{D_e}{\cos \theta} \quad (4.1)$$

- c) La pupila de salida es una imagen virtual del stop, ubicada dentro del sistema en un lugar inaccesible.

Se estudiará ahora con algo de más detalle estos tres tipos de instrumentos visuales.

Algunas consideraciones respecto a la ubicación de la pupila de salida en algunos sistemas visuales.

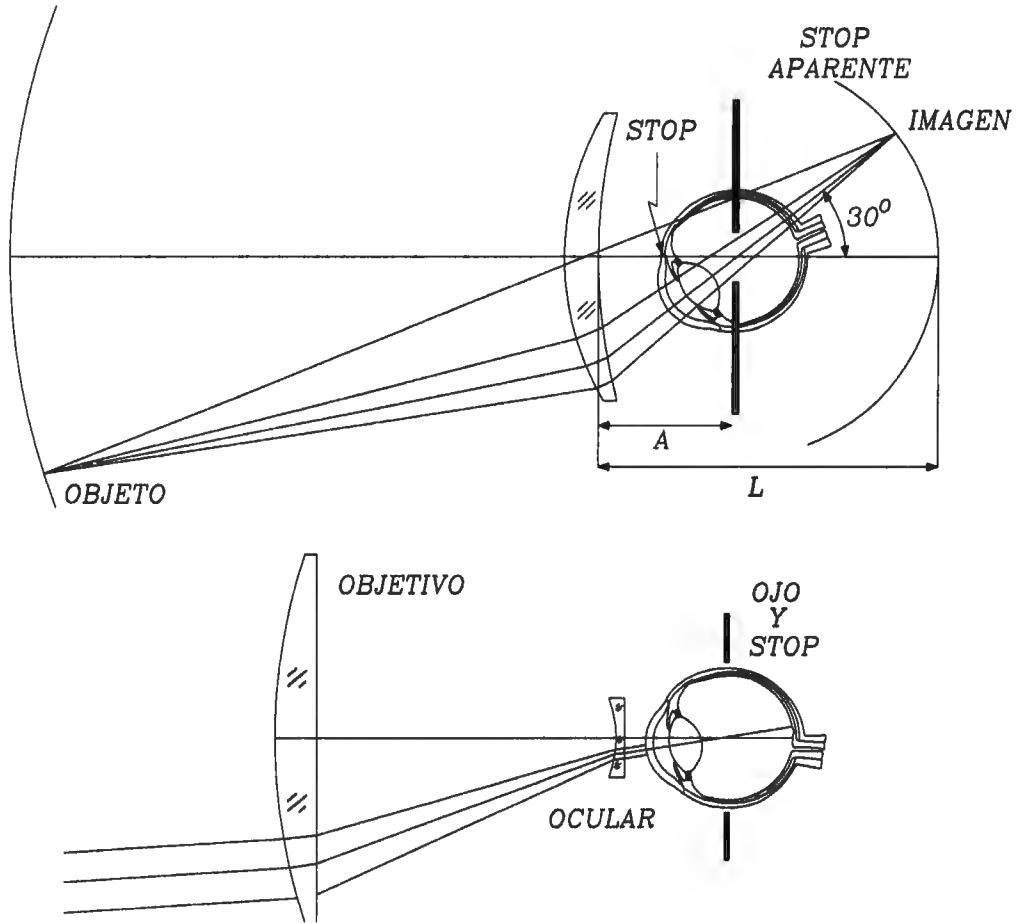


Fig. 4.2 Pupila de salida en una lente oftálmica y en un telescopio Galileano.

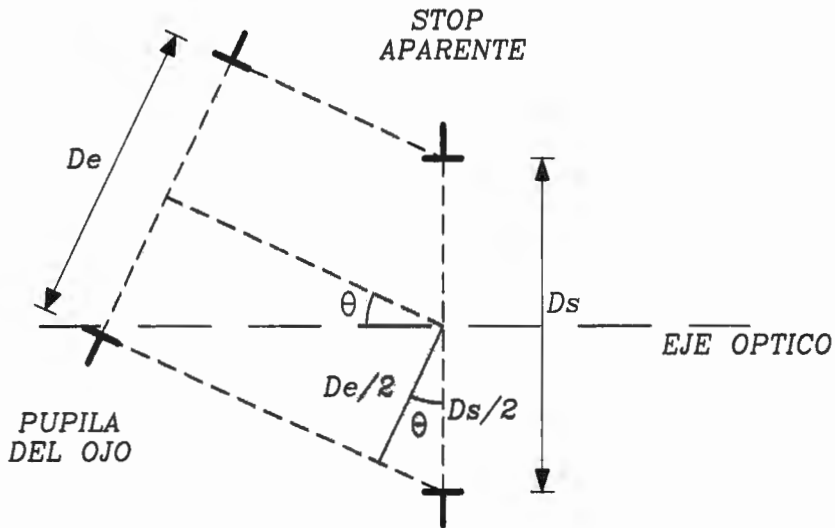


Fig. 4.3 Tamaño del Stop Aparente cuando el ojo rota en su cuenca en sistemas ópticos donde el stop y la pupila de salida del sistema están en la pupila del ojo.

4.3 Sistemas con una pupila de salida fija y accesible.

Es bien conocido que el *eye relief* en oculares de instrumentos visuales (Hopkins, 1962; Laikin, 1991) con una posición fija para la pupila de salida debe ser al menos de 10 mm para proveer suficiente espacio para las pestañas. Un *eye relief* de 15 mm provee una vista más confortable o aún 20 mm es necesario para gente que usa lentes. Para miras de rifle el *eye relief* debe ser de al menos 60 mm para dar espacio al retroceso del rifle. Usualmente, un *eye relief* grande requiere un diámetro grande para la lente ocular.

En estos sistemas donde la pupila de salida está determinada por un stop físico en el sistema, el cual no es la pupila del ojo, es comúnmente establecido que la pupila del ojo del observador debe estar en la pupila de salida del instrumento. Walker (Walker, 2000) señaló que cuando un observador mira a un objeto en el centro del campo como en la Fig. 4.4 (a) y luego rota el ojo para mirar a otro objeto en la orilla del campo, la pupila es automáticamente descentrada como en la Fig. 4.4 (b). Luego, el objeto en la orilla del campo es claramente visto pero menos brillante debido al efecto de viñeta que ha sido cuantitativamente analizado por Rosete-Aguilar y Rayces (Rosete, 2002) con buen detalle. La construcción geométrica utilizada por Rosete y Rayces para derivar la expresión del efecto de viñeta, para el caso de que solamente la orilla superior o la inferior de la pupila de salida produzca viñeta en los rayos que llegan al ojo, es la mostrada en la Fig. 4.5. Y la expresión derivada es

$$V_{\phi,\alpha} = \frac{AD}{AB} = 1 - \frac{R_{TP} - K \operatorname{sen} \phi_T + R_{IP} \cos \phi_T}{2R_{IP} \cos \phi_T} \quad (4.2)$$

donde $V_{\phi,\alpha}$ es la cantidad de viñeta, y su magnitud depende (Fig. 4.5) del tamaño del campo angular, ϕ_T ; del radio de la pupila del ojo, R_{IP} y del radio de la pupila de salida del instrumento, R_{TP} . Se asume, además, que la viñeta es la misma para cualquier dirección α de un punto general en el campo de vista del ojo del observador. K es la distancia del centro de rotación del ojo a la pupila del ojo y tiene un valor de 14 mm para un ojo emétrepe.

De esta manera, esta posición para el ojo del observador con respecto a la pupila de salida es correcta si los objetos de interés son pequeños y en la vecindad del eje óptico. Un típico ejemplo es un telescopio astronómico. Sin embargo, si los objetos de interés están localizados en muchos puntos sobre el campo completo, la viñeta aparece.

Esta viñeta puede ser evitada si la cabeza es ligeramente movida lateralmente para centrar nuevamente la pupila de salida del sistema con la pupila del ojo. El observador hace este ajuste para corregir este descentramiento (Walker, 2000) de una manera instintiva.



Algunas consideraciones respecto a la ubicación de la pupila de salida en algunos sistemas visuales.

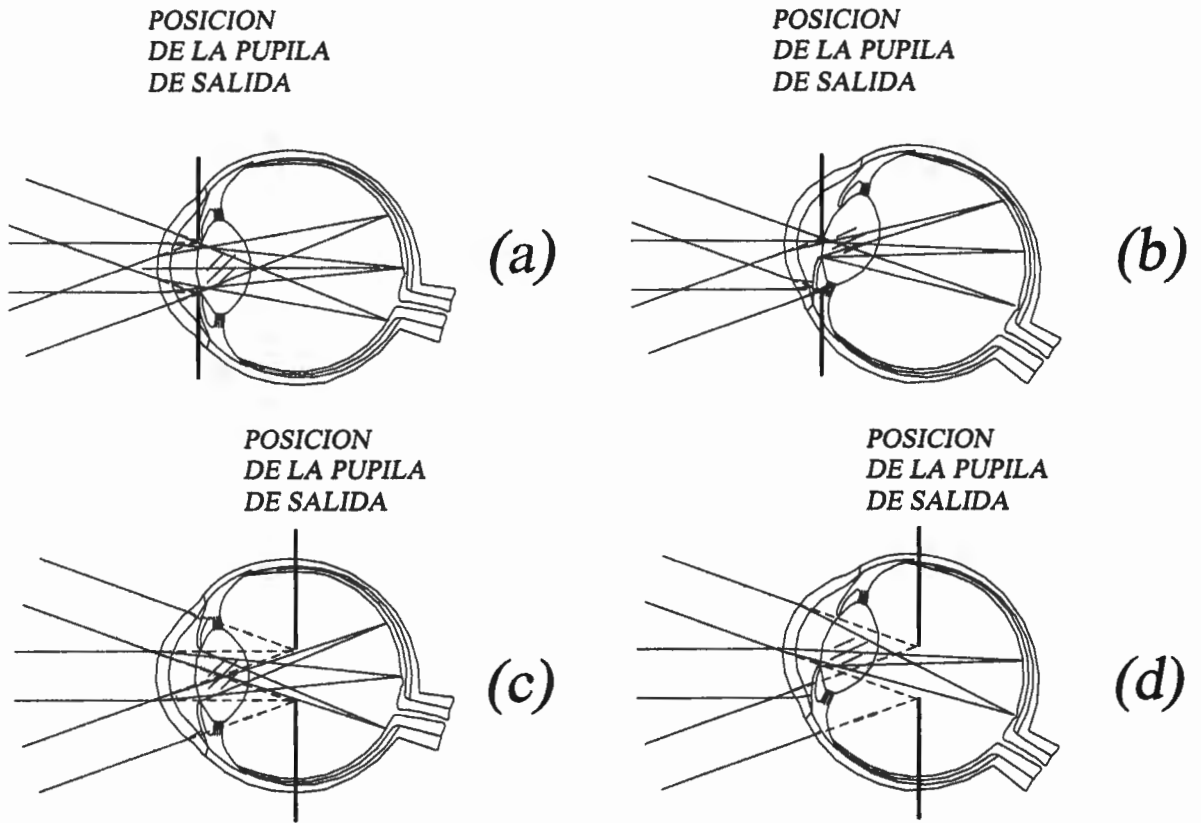


Fig. 4.4 Ilustración del bloqueo de la luz por la pupila del ojo para dos diferentes posiciones el ojo del observador.

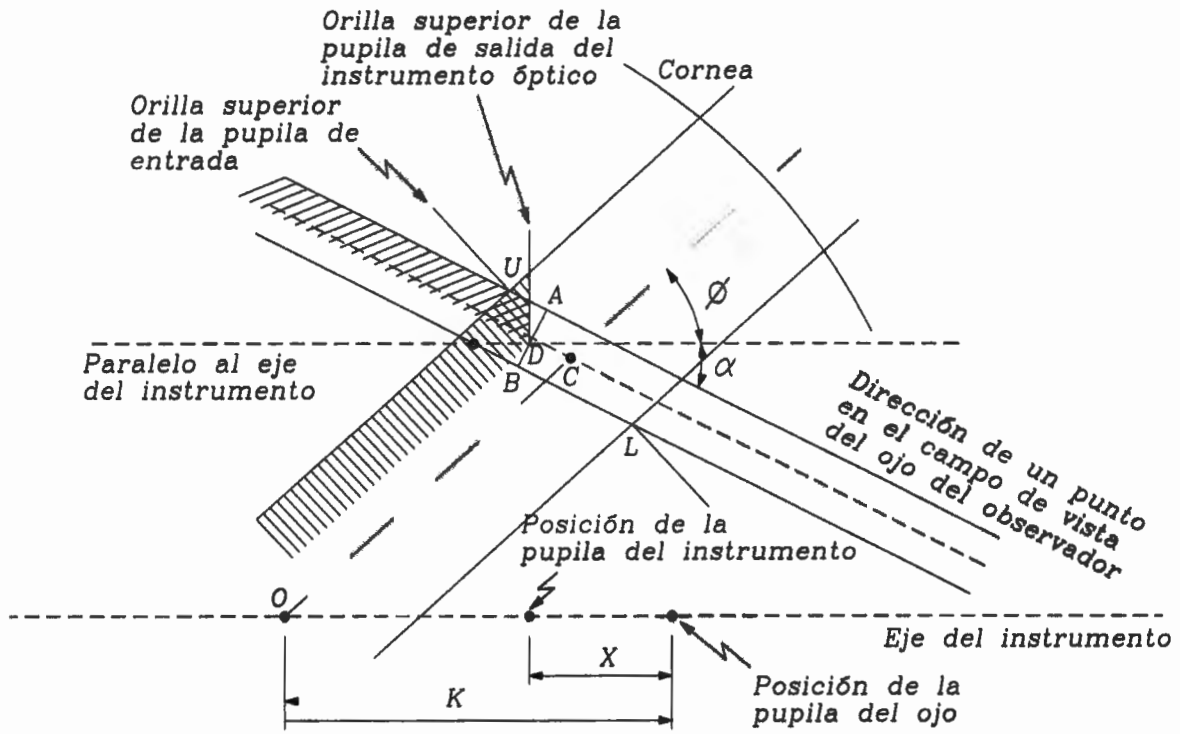


Fig. 4.5 Región de interferencia de la pupila de entrada del ojo y la pupila de salida del instrumento.

Una manera alternativa para evitar esta viñeta es seleccionar la posición de la pupila de salida en el centro del globo ocular, sin embargo este arreglo también tiene algunos problemas. Es claramente mostrado en la Fig. 4.4 (c) que en este caso la pupila del ojo debe ser más grande que la pupila de salida del sistema visual. Si la viñeta ha de ser evitada el diámetro D_e de la pupila del ojo debe al menos ser (ver Fig. 4.6)

$$D_e \geq D_s + 2C \tan \theta \quad (4.3)$$

donde D_s es el diámetro de la pupila de salida y C es el semidiámetro del globo ocular, considerado generalmente de 14 mm para un ojo emétrope.

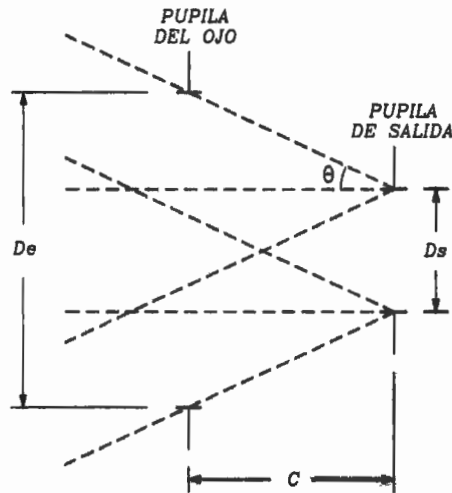


Fig. 4.6 Diámetro de la pupila de ojo para que no exista vifeta, cuando la pupila de salida del sistema es colocada en el centro del globo ocular, en instrumentos donde la pupila se salida está determinada por un stop físico que no es la pupila del ojo.

En este caso el diseño del ocular llega a ser más complicado debido a que el diámetro de la lente ocular también se incrementa grandemente.

Cuando se mira a un objeto en el centro del campo todos los objetos en cualquier posición dentro del campo tendrán el mismo brillo aparente. Sin embargo, si un objeto en la orilla del campo es directamente observado como en la Fig. 4.4 (d), y la pupila de salida del sistema es más pequeña que la pupila del ojo, los objetos localizados en el lado opuesto del eje óptico, del objeto de interés, se verán mucho más borrosos o aún invisibles, como se muestra en la Fig. 4.7.

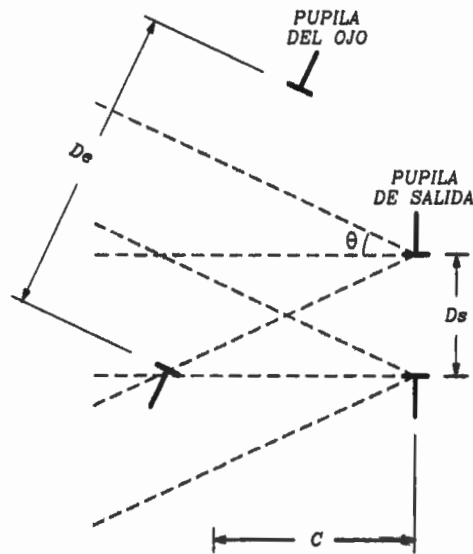


Fig. 4.7 Bloqueo de la luz de un objeto en el lado opuesto del eje óptico por la pupila del ojo del observador cuando el ojo es rotado y la pupila de salida está en el centro del globo ocular.

Si la pupila de salida del sistema óptico es mucho más pequeña que la pupila del ojo los efectos de viñeta son pequeños y de esta manera la tolerancia en la posición del ojo a lo largo del eje óptico es mucho más grande. Un ejemplo de este tipo de sistema es un microscopio de campo ancho o un oftalmoscopio indirecto. Idealmente, el eye relief debe ser suficientemente grande para poder colocar el centro de rotación del ojo en la pupila de salida del sistema. Sin embargo, esta condición tiende a incrementar demasiado el diámetro necesario de la lente ocular. Luego, una solución intermedia es prudente como un compromiso como claramente señaló Rosete-Aguilar y Rayces (Rosete-Aguilar, 2002).

4.4 Sistemas donde el stop es la pupila del ojo.

El segundo caso de sistema óptico es cuando el stop del sistema es la pupila del ojo del observador, eso es, que el sistema óptico no tiene una pupila de salida o stop cuando el ojo es removido, como en lentes oftálmicas, amplificadores o sistemas con un campo ancho como se ilustró en la Fig. 4.2. La pupila de salida es la pupila del ojo, sin embargo es un stop movable que se mueve con el ojo. Cuando se diseña este tipo de sistemas la evaluación de la calidad de la imagen debe ser hecha con el stop en una posición diferente fuera de eje para cada dirección de vista fuera de eje. En este caso es mejor considerar un stop fijo localizado en el centro de rotación del ojo.

En estos sistemas los efectos de viñeta no aparecen. Sin embargo, cuando se diseñan estos sistemas una de las siguientes dos situaciones diferentes debe ser considerada:

- a) Los objetos de mayor interés están siempre cerca del centro del campo. Objetos en la periferia nunca son directamente observados pero su presencia es importante. Por ejemplo, cuando se usan lentes leemos moviendo lentamente nuestra cabeza para mantener las letras en el eje óptico. Las imágenes de los objetos en la periferia, eso es, de los objetos fuera de eje, deben ser claramente formadas sin necesidad de rotar el ojo, principalmente por razones de seguridad. En este caso la pupila de salida debe ser considerada en la pupila del ojo. Este caso ha sido recientemente estudiado (Smith, 2002).

- b) Los objetos de interés están distribuidos sobre el campo completo de vista y el instrumento no puede ser rápida y constantemente movido para centrar el eje óptico en el objeto observado. Un ejemplo típico es un telescopio galileano para observar una pantalla con texto. Idealmente, el telescopio debe estar fijo y solamente los ojos deben moverse. Otro ejemplo son los lentes usados para leer rápido un texto de campo ancho. Entonces, la situación práctica es que la cabeza del observador esté fija con sus ojos moviéndose rápido. En estos casos cuando se diseña, la pupila de salida puede ser considerada a estar en el centro de rotación del ojo así estamos siempre corrigiendo la imagen foveal.

En la Fig. 4.8 (a) el haz fuera de eje produce una imagen extra foveal. Cuando el ojo rota el haz fuera de eje no puede entrar al ojo, como se ilustra en la Fig. 4.8 (b), a menos que el ojo esté lateralmente desplazado como en la Fig. 4.8 (c) entonces, el haz fuera de eje produce una imagen foveal. El sistema óptico puede ser diseñado para producir la mejor imagen posible fuera de eje, o cuando el ojo no está rotado como en la Fig. 4.8 (a) o cuando el ojo está rotado como en la Fig. 4.8 (b). En el primer caso hablamos de imagen no foveal periférica y en el segundo caso de imagen foveal periférica. Un sistema óptico como este, no puede ser optimizado para ambas situaciones. El diseñador debe seleccionar si colocar la pupila de salida en la pupila del ojo o en el centro de rotación del globo ocular. La selección depende de la importancia relativa que el diseñador da a la visión periférica, acorde a la aplicación. En ninguno de estos dos casos hay viñeta.

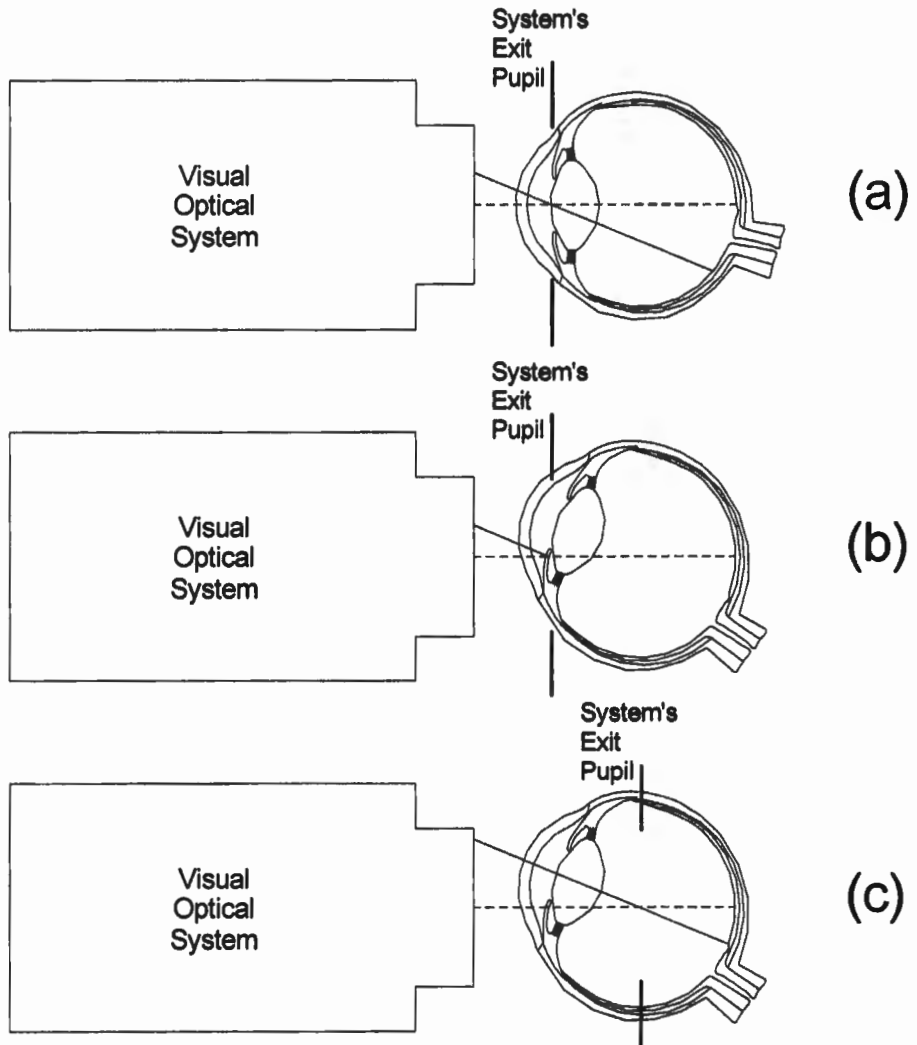


Fig. 4.8 Objetos observados en eje y fuera de eje en un sistema óptico visual.

4.5 Sistemas con una pupila de salida fija e inaccesible.

Algunos instrumentos tienen una pupila de salida ubicada dentro de los sistemas y en un lugar inaccesible. Dicho de otra manera, es una imagen virtual del stop. Un ejemplo de este tipo de sistema es un telescopio Galileano con un diámetro de objetivo relativamente pequeño, como se ilustra en la Fig. 4.9. En estos casos la viñeta es inevitable y no hay una ubicación ideal para el ojo. Lo mejor que podemos hacer es colocar el ojo tan cerca como sea posible del ocular.

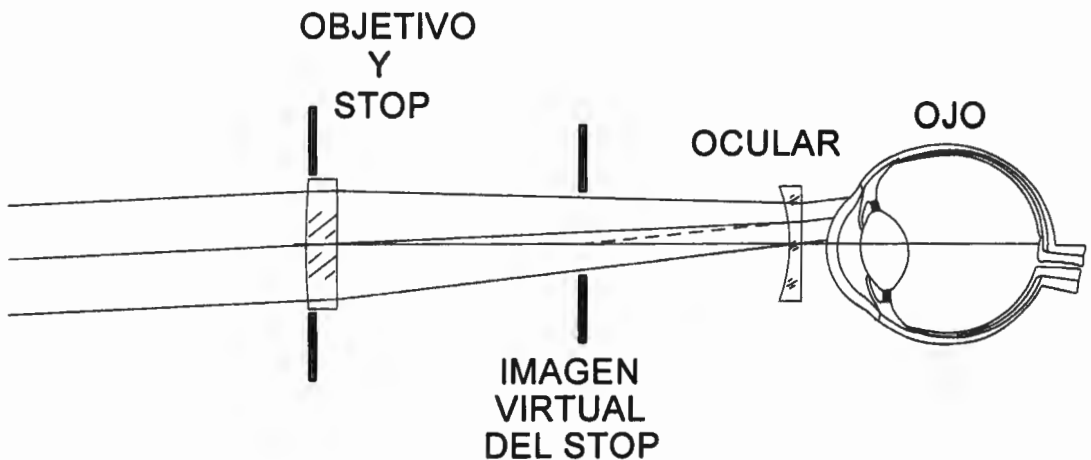


Fig. 4.9 Un Telescopio Galileano con una pupila de salida virtual.

4.6 Conclusiones.

Se describieron algunas de las posibilidades para la mejor selección de la ubicación del ojo en sistemas ópticos visuales. No hay una posición única bien definida sino varias dependiendo de la configuración y aplicación del sistema visual. En conclusión, la mejor posición para el ojo no tiene una solución simple y se debe tener cuidado cuando se realiza el diseño óptico.

Agradecimientos.

Los autores desean agradecer los valiosos comentarios durante el desarrollo del trabajo por parte de la Dr. Martha Rosete y varios otros colegas.

4.7 Referencias.

- Hecht, E., *Óptica*, Addison Wesley Iberoamericana, Madrid, p. 218, (2000).
- Smith, F. and J. Thompson, *Óptica*, Limusa, México, p. 173, (1979).
- Vaissie, L., J. P. Rolland and G. M. Bochenek, "Analysis of eyepoint locations and accuracy of rendered depth in binocular head-mounted displays", in Conference on Stereoscopic Displays and Applications X, *Proc. SPIE*, v. 3639, pp. 57-64, (1999).
- Vaissie, L. and J. P. Rolland, "Accuracy of rendered depth in head-mounted displays: role of eyepoints location", in Helmet and Head-Mounted Displays V, *Proc. SPIE*, v. 4021, pp. 343-353, (2000).

- Hopkins, R. E., Eyepieces, in *Military Standardization Handbook: Optical Design, MIL-HDBK 141* (U. S. Defense Supply Agency, Washington D. C., (1962).
- Laikin, M., *Lens Design*, M. Dekker, New York, p. 101, (1991).
- Walker, B., *Optical Design for Visual Systems*, SPIE Press, Bellingham, Washington, (2000).
- Rosete-Aguilar, M. and J. L. Rayces, “Eye rotation and vignetting in visual instruments”, *Appl. Opt.*, v. 41, pp. 6593-6602, (2002).
- Smith, G., D. A. Atchison, C. Avudainayagam and K. Avudainayagam, J., “Designing lenses to correct peripheral refractive errors of the eye”, *Opt. Soc. Am. A*, v. 19, pp. 10-18, (2002) 10.

Conclusiones y Trabajo a Futuro

En esta investigación se presentaron dos problemas de diseño óptico y sus respectivas soluciones: la corrección de la aberración de keystone en un proyector de acetatos convencional y un estudio sobre la mejor ubicación del ojo en sistemas ópticos.

En la primera parte de este trabajo, se explicó qué es la distorsión de keystone, que ocurre en los proyectores de acetatos cuando el espejo que forma parte de la configuración es inclinado para subir la imagen sobre la pantalla. Se propuso una modificación al típico proyector de acetatos para corregir dicha aberración en la imagen. Se mostró que para corregirla, sólo es necesario inclinar la lente de Fresnel y suministrar una nueva lente proyectora, manteniendo el resto de la configuración del proyector igual. Se obtuvo que el proyector de acetatos modificado, además de corregir la aberración de keystone, tiene una calidad de imagen buena y sin ningún desenfocamiento. En conclusión, cualquier proyector de acetatos convencional puede ser diseñado de esta manera.

Para el futuro se pueden ver varias posibilidades para corregir la aberración de keystone, una de ellas es probando con la posibilidad de introducir en la lente una gran distorsión para compensar dicha aberración.

En la segunda parte de la investigación se analizaron algunos de los muchos factores que determinan la mejor posición de la pupila del ojo del observador con respecto al sistema óptico. En base a los anteriores factores, se describieron las distintas posibilidades para la ubicación de la pupila del ojo en algunos instrumentos ópticos visuales. Se demostró que dicha ubicación no siempre es la pupila de salida del instrumento. Se expusieron los pros y contras de colocar la pupila de salida en la pupila del ojo o en el centro de rotación del globo ocular en algunos sistemas ópticos cuya pupila de salida es la pupila del ojo. En conclusión, la mejor posición para el ojo no tiene una solución simple y las consecuencias prácticas de este problema son muy importantes para el diseño de sistemas visuales.

Los resultados obtenidos de este estudio se integrarán en el diseño de un buen oftalmoscopio para que tenga un ocular con una pupila de salida cómoda para el observador, y en el cual se elimine la aberración de keystone que, aunque no es muy grande, existe.

Aún hay mucho por investigar en el área del diseño óptico, por lo que a futuro se seguirá trabajando en otros problemas relacionados con dicha área.