

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE CIENCIAS FISICO-MATEMATICAS



DESARROLLO DE UN PROGRAMA DE
COMPUTADORA DE APOYO EN EL
PRE-DISEÑO DE SISTEMAS OPTICOS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
LICENCIADO EN FISICA

PRESENTA
CESAR ALBERTO NUÑEZ LOPEZ

MONTERREY, N. L.

MARZO DE 1987

TL

QC385

.N86

1987

c.1



1080171549

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE CIENCIAS FISICO-MATEMATICAS

A MIS PADRES



DESARROLLO DE UN PROGRAMA DE
COMPUTADORA DE APOYO EN EL
PRE-DISEÑO DE SISTEMAS OPTICOS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
LICENCIADO EN FISICA

PRESENTA
CESAR ALBERTO NUÑEZ LOPEZ

MONTERREY, N. L.

MARZO DE 1987



A MIS PADRES:

A MIS COMPAÑEROS Por el apoyo que siempre me han
brindado y por el cariño que
siempre les tendré.

Por haber compartido el trabajo,
las responsabilidades y una
salud sincera a lo largo de
estos primeros años.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a las autoridades académicas y administrativas del Centro de Investigaciones en Física de León por las facilidades brindadas para que este trabajo de tesis pudiera ser concluido. Y a la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas de la Universidad Autónoma de Nuevo León. Especialmente al Director de la Facultad M. en C.

A MIS COMPAÑEROS DE LA F.C.F.M.:

Por haber compartido el trabajo,
las responsabilidades y una
amistad sincera a lo largo de
estos primeros años.

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento a las autoridades académicas y administrativas del Centro de Investigaciones en Óptica, de León Guanajuato, por las facilidades brindadas para que este trabajo de tesis pudiera ser concluido. Y a la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas de la Universidad Autónoma de Nuevo León. Especialmente al Director de la Facultad M. en C. Luis Vicente García González por el apoyo que siempre me brindó.

A mi asesor: M. en C. Ricardo Flores Hernández, quien me alentó y apoyó en todo el tiempo que trabajé con él.

Como también a todos mis compañeros del C.I.O. que de alguna manera colaboraron en la elaboración de este trabajo.

INTRODUCCION GENERAL

Cuando usamos una cámara fotográfica, un telescopio o una computadora, obtenemos la "imagen" de algún objeto de nuestro especial interés. Veamos la fotografía de un planeta, la imagen de una estrella o la reproducción de algún fenómeno interesante. Más que la reproducción, lo que nos interesa es el proceso, presentamos brevemente los fundamentos que sustentan la óptica involucrada en el funcionamiento de cada uno de ellos.

INDICE

Pág

INTRODUCCION.....	1
I.- CONCEPTOS GENERALES DE LA OPTICA GEOMETRICA.....	5
II.- METODO MATRICIAL DEL TRAZO PARAXIAL DE RAYOS.....	22
III.- ABERRACIONES DE TERCER ORDEN.....	27
IV.- DOBLETES ACROMATICOS.....	41
V.- DIAGRAMAS $y-\bar{y}$ Y $\alpha-\bar{\alpha}$	52
VI.- CONCLUSIONES.....	67
BIBLIOGRAFIA.....	68
APENDICE A	
MANEJO DEL PROGRAMA.....	A1
APENDICE B	
LISTA DE VARIABLES Y SUBROUTINAS.....	B1
APENDICE C	
LISTADO DEL PROGRAMA.....	C1

INTRODUCCION GENERAL

Cuando usamos una cámara fotográfica, un telescopio o una copiadora, obtenemos la "imagen" de algún "objeto" de nuestro especial interés, ya sea la fotografía de una persona, la imagen de una estrella o la reproducción de algún manuscrito interesante. Más que la explicación física de cómo es que ocurre el proceso, prestemos atención a los elementos que, fundamentalmente, producen ese resultado: es decir, a las lentes que integran la cámara fotográfica, el telescopio o la máquina copiadora.

Todas las cámaras fotográficas usan lentes y sin embargo no todas las cámaras fotográficas son iguales pues no reproducen las imágenes de los objetos con la misma nitidez, tamaño, calidad de color, etc.

Lo mismo ocurre con los telescopios, las máquinas copiadoras y muchos otros instrumentos ópticos: ¿Qué hace a un instrumento diferente de otro?. La manera en que cada instrumento tiene distribuidos sus lentes, y las características de cada lente son los que producen las diferencias: cada instrumento posee diferentes sistemas de lentes.

Todo sistema óptico, que en principio es un conjunto de lentes, se diseña para algún fin específico: un telescopio, una cámara fotográfica, un microscopio, etc. y la elección del diseño depende de los requisitos que cada diseño óptico debe cumplir; no se piden los mismos requisitos para el diseño de un telescopio que para el diseño de un microscopio.

Para diseñar un sistema óptico se consideran ciertos factores de modo que se pueda elegir una configuración tal de los elementos del sistema óptico que éste dé el resultado esperado dentro de los márgenes de "error" tolerados; se consideran, por ejemplo, los costos de producción, la calidad de la imagen (los máximos valores permitidos en las "aberraciones" o defectos de la imagen), el número de elementos que deben formar el sistema óptico, la longitud total del sistema óptico, en fin, podemos darnos cuenta de que el número de factores a considerar dependerá de las funciones que deba desempeñar nuestro sistema óptico y de las restricciones a que se someta.

Como un ejemplo de esto, hablemos sobre la "imagen" que debemos obtener de algún sistema óptico en particular: las aberraciones de cualquier sistema óptico determinan la claridad de la imagen que de este se puede obtener y por ello, cuando se pretende tener una mejor similitud de la imagen con el objeto real se busca que las aberraciones sean mínimas; sin embargo, según sean las necesidades, puede ser que en nuestro diseño no sea de interés el que todas las aberraciones sean nulas por lo que trataremos de llevar hasta un mínimo solo aquellas que sea necesario, hecho que viene a facilitar el diseño de las lentes individuales del sistema y de este en general.

Quienes se encargan de resolver estos problemas son los diseñadores ópticos. Se les pide que diseñen un sistema óptico que cumpla con tales o cuales especificaciones. Hace 60 años, diseñar un sistema óptico para algún fin específico tomaba semanas e incluso meses y requería de mucho trabajo matemático y experiencia por parte de los diseñadores.

Cuando se proponía un diseño óptico en particular, este se debía de analizar matemáticamente, análisis sumamente tedioso en el que se utilizaba el trazo gráfico exacto de rayos en escala gigantesca donde las "mesas de dibujo" eran canchas de basquetbol; sin embargo, este procedimiento era indispensable pues solo así se podía verificar si el modelo del sistema óptico diseñado cumplía con los requisitos para los cuales se había elaborado, antes de producirlo materialmente.

Se buscaron nuevos métodos de análisis más sencillos como el mostrado por T. Townsend Smith de la Universidad de Kansas en 1917, el cual viene a anteceder el método matricial para el trazo de "rayos" desarrollado en los 60's por K. Halbach, W Brouwer y otros más.

Otros métodos muy usados en el diseño de sistemas ópticos son el de "sumas G" y el "ynv tabular", ambos consisten del cálculo de rayos paraxiales y de las aberraciones de tercer orden.

En el primero, las aberraciones se calculan con los datos de un solo rayo paraxial, el llamado rayo principal; y en el segundo, las aberraciones se obtienen a partir de los datos de dos rayos paraxiales el marginal "a" y el principal "b" trazados a través del sistema.

Todos esos análisis tediosos y complicados, terminaron cuando se introdujo una nueva herramienta al servicio, en este caso, de los diseñadores ópticos: la computadora. A partir de ese momento, los diseñadores no solo producen diseños ópticos en tiempos más cortos, sino que estos son mejores que antes.

Ya en 1966 la Eastman Kodak Co. de Rochester (N.Y.) contaba con un programa de computadora llamado LEAD el cual eliminaba muchas de las decisiones subjetivas que el diseñador óptico normalmente hacía para el balance de aberraciones, cumpliendo los requisitos que se especificaran tales como: distancias focales, ángulo de campo, abertura numérica, etc. logrando disminuir sensiblemente el tiempo de realización de los diseños. Tomaba aproximadamente 40 horas el diseño total de una lente con un costo por tiempo de computadora de unos \$1,000.00 dls.

De este modo el diseño de sistemas ópticos es una tarea más sencilla cuanto más completo sea el sistema computacional usado.

Al hablar del análisis de los sistemas ópticos faltó mencionar otro método, ahora de evaluación y auxiliar en el diseño de sistemas ópticos; es el llamado diagrama $y-\bar{y}$ (leese ye, ye barra) que fué introducido por Erwin Delano en 1963 el cual es una representación bidimensional de las propiedades, a primer orden, de un sistema óptico. Puede servir como base para el análisis de estas propiedades y para hacer más notables los efectos de cambios introducidos al sistema durante el proceso de diseño.

En este análisis se reemplazan las variables usuales de diseño (curvaturas de las superficies que forman las lentes y los grosores e índices de refracción de los mismos) por las magnitudes de las alturas y ángulos de los rayos principal y marginal trazados a través del sistema óptico.

Existe un diagrama equivalente al diagrama $y-\bar{y}$; este es el diagrama $\Omega-\bar{\Omega}$ (leese omega, omega barra) en el cual Ω y $\bar{\Omega}$ son las coordenadas mientras que y e \bar{y} son considerados los parámetros.

Una vez que hemos hecho un esbozo de lo que es el diseño óptico pasaremos a exponer brevemente el tema de esta tesis pro-

piamente dicho.

DESCRIPCION GENERAL DEL TEMA DE TESIS

Actualmente existen grandes programas de computadora capaces de resolver hasta los problemas más complicados que se planteen en el diseño de sistemas ópticos.

En el presente trabajo de tesis se desarrolla un programa de computadora capaz de evaluar cualquier sistema óptico con superficies esféricas, con la restricción de que este debe ser centrado, esto es, que todos los centros de curvatura de las superficies refractoras se encuentren sobre el eje óptico del sistema.

Conociendo las características físicas del sistema que se esté diseñando, como son los índices de refracción, grosores y curvaturas de las superficies refractoras, se obtienen como resultado sus puntos focales y principales, el trazo de rayos en la región paraxial, el cálculo de las aberraciones geométricas de tercer orden conocidas con el nombre de aberraciones de Seidel como son: distorsión, curvatura de Petzval, curvatura de campo, esférica, coma, astigmatismo; así como las aberraciones cromática axial y cromática lateral. Cuenta además con la capacidad de diseñar semiautomáticamente dobletes acromáticos cementados en la región de los mínimos de dos aberraciones geométricas y una cromática dando un mapeo de las curvas de ceros para las aberraciones cromáticas y de Seidel en función de los parámetros de diseño, pudiendo elegir así los que más se adapten a los requisitos impuestos al sistema.

Incluye la conversión de los datos obtenidos en el trazo de rayos a los diagramas $y-\bar{y}$ y $\alpha-\bar{\alpha}$ mediante las transformaciones adecuadas, proporcionando la gráfica en pantalla de estos diagramas con las consecuentes ventajas para la apreciación de las propiedades del sistema.

Con todo esto se proporciona al usuario un medio sencillo para el análisis y diseño de cualquier sistema óptico centrado.

Este programa será un conveniente apoyo para el curso de óptica geométrica dando oportunidad a que los estudiantes puedan verificar rápidamente las cualidades de su diseño y si este cumple o no las especificaciones planteadas, pudiendo observar también los cambios en las propiedades del sistema (por medio de los diagramas $y-\bar{y}$ y $\alpha-\bar{\alpha}$) debidos a las variaciones de los valores que se hayan suministrado a cualquiera de las variables, ya que el programa está capacitado para el cambio de las magnitudes de las variables originales según sea la necesidad y selección del usuario.

DESCRIPCION POR CAPITULOS

En el capítulo primero se tratan los conceptos generales de la óptica geométrica tales como lentes, rayos, puntos focales, nodales y principales, potencia de una lente, las leyes de reflexión y refracción, rayos principal y marginal, pupilas de entrada y de salida, eje óptico, espacio objeto, espacio imagen, etc. así como el método yny tabular para el trazo de rayos paraxiales.

En el capítulo segundo se analiza el cálculo matricial para el trazo de rayos paraxiales por ser este más conveniente para programación en computadora introduciendo la notación que se empleará en los diagramas $y-\bar{y}$ y $\Omega-\bar{\Omega}$ tratados en el capítulo quinto.

En el capítulo tercero se trata el concepto de aberración desde el punto de vista de la teoría a tercer orden y se discute su importancia dentro del diseño de sistemas ópticos.

En el capítulo cuarto se analizan los dobletes acromáticos cementados, ya que con este tipo de componentes ópticos disminuye el número de variables independientes de diseño con lo que se facilita la fabricación y se mejora la estabilidad mecánica del sistema obteniendo además bajos valores de aberraciones. El programa le presenta al usuario un mapeo de las curvas de ceros de las aberraciones para un diseño específico lo que le permite seleccionar el diseño que se acerque más a los requisitos planteados.

El capítulo quinto explica la representación gráfica de un sistema en los diagramas $y-\bar{y}$ y su equivalente $\Omega-\bar{\Omega}$, analizándose algunos ejemplos.

En el capítulo sexto se presentan las conclusiones y comentarios finales de esta tesis.

Por comodidad tanto de la presentación de la teoría así como del manejo de los ejemplos numéricos, todos ellos se encuentran agrupados al final de la tesis como apéndices.

El programa desarrollado no pretende ser exhaustivo, sino que es un primer auxiliar en el diseño de sistemas ópticos, es decir, con su ayuda es posible efectuar el pre-diseño de cualquier sistema óptico centrado y es además un medio de apoyo para que estudiantes a nivel licenciatura y maestría principalmente logren una rápida asimilación de los temas y conceptos de la Óptica geométrica.

CAPITULO I

CONCEPTOS GENERALES DE LA OPTICA GEOMETRICA

1.- INTRODUCCION

En el diseño de sistemas ópticos es necesario una terminología clara y bien definida de los conceptos y las definiciones de las variables y magnitudes que se emplean en óptica geométrica; esta última se fundamenta en los conceptos de rayo luminoso y en las leyes de reflexión y refracción de la luz. Es por eso que en este capítulo expondremos los conceptos y definiciones básicos que se deben manejar en el diseño de sistemas ópticos procurando, en la manera que sea posible, que estos sean claros y sencillos.

Por esta razón no se expondrán las demostraciones de las leyes que se expongan ni de los resultados que estas traen consigo pues ese no es el fin de este trabajo de tesis y además será muy sencillo que la persona que esté interesada en las demostraciones de algunos de los conceptos, las localice en cualquier libro de Óptica Geométrica.

Así pues, al terminar de leer este capítulo el usuario tendrá un resumen de los términos que se usan en esta tesis para emplear de una manera eficiente el programa de cómputo desarrollado, suministrando los datos adecuados e interpretando correctamente los resultados que de este se obtengan.

2.- DEFINICIONES

Antes que todo cabe mencionar que por un Sistema Óptico debemos entender un conjunto de componentes ópticas tales como: lentes, prismas, espejos etc. y la forma en que estas estén dispuestas en el diseño depende de la finalidad del sistema en cuestión. En nuestro caso trataremos de Sistemas Ópticos formados únicamente por lentes de superficies refractoras esféricas, pudiendo estar presentes además láminas de superficies plano paralelas que sirvan como diafragmas o retículas.

Por medio del concepto rayo se entiende en el contexto de la óptica geométrica un haz de luz de sección transversal nula, que se propaga en forma rectilínea en cualquier medio homogéneo. Por su propia definición el concepto de rayo constituye una abstracción física, sin embargo, debido al valor de la longitud de onda de la luz en el intervalo visible (400-700 nm), los diámetros de cualquier lente, incluidas los objetivos de microscopio, son mucho mayores por lo que podemos desprestigiar los efectos de difracción.

Definiremos ahora una cantidad que expresa la "naturaleza" de un medio en el cual se propaga un rayo.

El índice de refracción de un medio homogéneo ideal (n) es una magnitud real que se define como el cociente de dividir la velocidad de la luz en el vacío (c) y la velocidad de la luz en el medio (v):

También es conocida como la ley de Snell (ver Fig. 1.1).

El índice de refracción $n = c/v$ de los dos medios es dado por: (1.1)

Interfase es la superficie que separa a dos medios con índices de refracción diferentes.

Las consideraciones físicas fundamentales en las que se basa la óptica geométrica son:

- i).- La propagación de la energía luminosa a través de cualquier medio se realiza mediante rayos.
- ii).- Los rayos se propagan en forma rectilínea en medios homogéneos isotrópicos que son los únicos que se considerarán en esta tesis.
- iii).- No existe ninguna interacción entre los rayos cuando estos se cruzan.

Finalmente están las leyes de reflexión y refracción de la luz, las cuales expondremos a continuación.

Un rayo experimenta una reflexión, cuando al incidir sobre una interfase no la cruza sino que solo cambia su dirección de propagación dentro del mismo medio obedeciendo las siguientes leyes:

- 1).- El rayo incidente, el rayo reflejado y la normal a la superficie en el punto de incidencia se encuentran en un mismo plano.
- 2).- El ángulo que forma el haz reflejado con la normal y el que forma el haz incidente con la normal es el mismo (ver fig. 1.1).

Un rayo experimenta una refracción cuando al incidir sobre una interfase la atraviesa, propagándose en el segundo medio con una dirección diferente. La refracción obedece a las siguientes leyes:

- 1).- El rayo incidente, la normal y el rayo refractado se encuentran en un mismo plano, y
- 2).- La razón del seno del ángulo que forma el haz incidente con la normal a la superficie y el seno del ángulo que forma el haz refractado con la misma normal es constante para dos medios ópticos dados.

Esta constante es llamada índice relativo de refracción de los dos medios.

La expresión matemática de esta segunda ley de la refracción está dada por:

$$n \sin \theta = n' \sin \theta' \tag{1.2}$$

donde n es el índice de refracción del primer medio, θ es el ángulo que forma el haz incidente con la normal, n' es índice de refracción del segundo medio y θ' es el ángulo que forma el haz refractado con la perpendicular a la superficie. Esta relación

También es conocida como la ley de Snell (ver fig. 1.2).

El índice de refracción relativo a los dos medios (n'') está dado por:

$$n'' = n' / n = \frac{\sin \theta}{\sin \theta'} = \text{constante} \quad (1.3)$$

Una propiedad muy importante de los sistemas ópticos es que el producto del índice de refracción de un medio por el seno del ángulo entre la normal a la superficie y el rayo por la altura del rayo en cada refracción es una magnitud constante llamada invariante óptico de Lagrange:

$$n \sin v = n' \sin v' \quad (1.4)$$

Una lente es un medio óptico de un índice de refracción n limitado por dos interfases.

Por un objeto se entiende un cuerpo físico de cuyos puntos se emiten rayos hacia un sistema óptico; el espacio donde se encuentra situado se llama espacio objeto. Si desde un punto objeto se emiten al menos dos rayos con ángulos de propagación diferentes, es posible calcular el punto de intersección de estos, después de atravesar el sistema óptico tal punto se llama punto imagen de dicho punto objeto. El conjunto de puntos imagen constituye la imagen del objeto. El espacio donde se encuentran las imágenes de los objetos se llama espacio imagen.

Tanto el espacio imagen como el espacio objeto pueden abarcar desde $-\infty$ hasta $+\infty$ a lo largo del eje óptico del sistema.

La imagen que se forma con la intersección de los propios rayos se llama imagen real, mientras que la que se forma con la intersección de sus prolongaciones será una imagen virtual.

Se llama amplificación, aumento lateral o amplificación transversal a la relación entre el tamaño de la imagen (y') y el tamaño del objeto (y):

$$M = \frac{\text{tamaño de la imagen}}{\text{tamaño del objeto}} = \frac{y'}{y} \quad (1.5)$$

Las superficies que forman una lente pueden ser esféricas, planas, cilíndricas, tóricas, cónicas y esféricas (secciones cónicas de rotación).

Un sistema óptico formado por un arreglo de superficies reflectoras y/o refractoras es un sistema óptico centrado si todas sus superficies poseen un eje de simetría rotacional común, este mismo eje se denomina eje óptico del sistema. Dicho de otra manera, se tiene un sistema óptico centrado cuando los centros de curvatura de las superficies se encuentran sobre una misma recta llamada eje óptico (fig. 1.3).

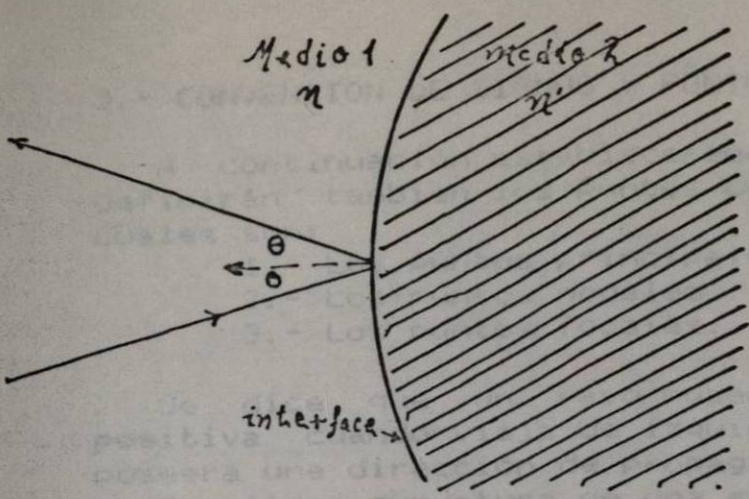


Fig. 1.1 Reflexión de la luz.

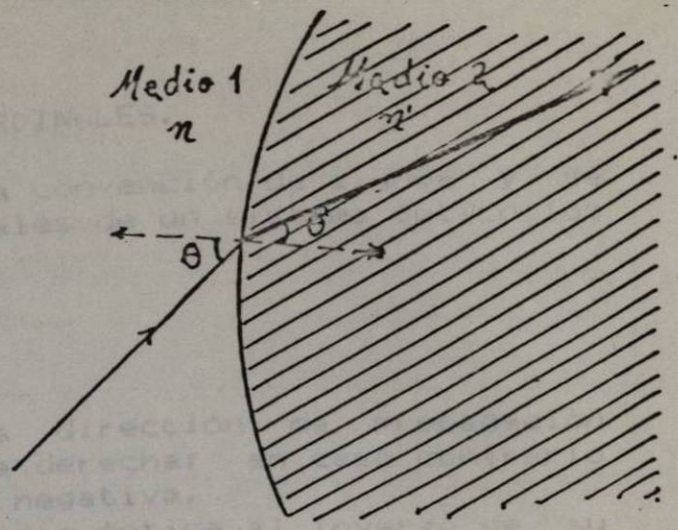


Fig. 1.2 Refracción de la luz.

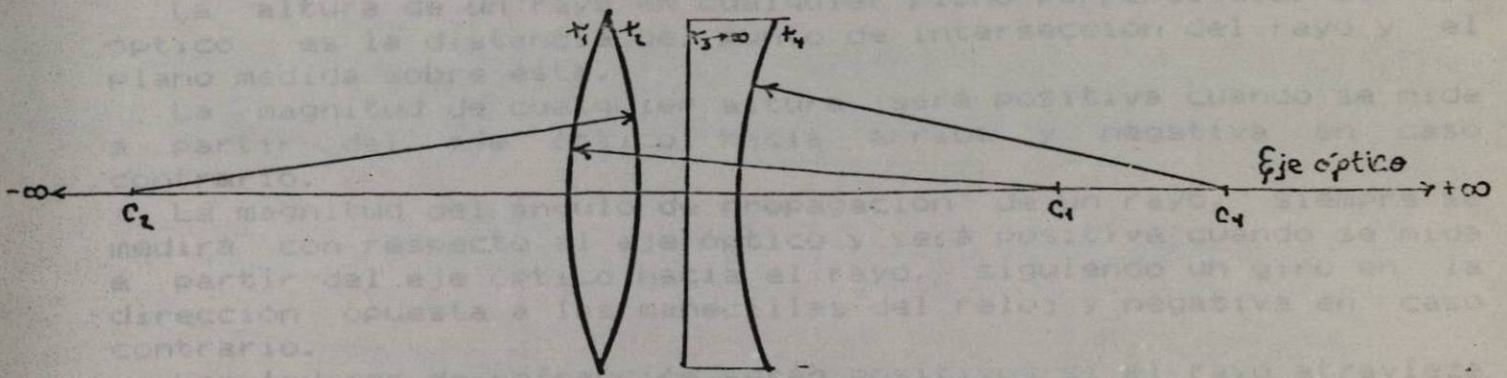


Fig. 1.3 Sistema óptico centrado.

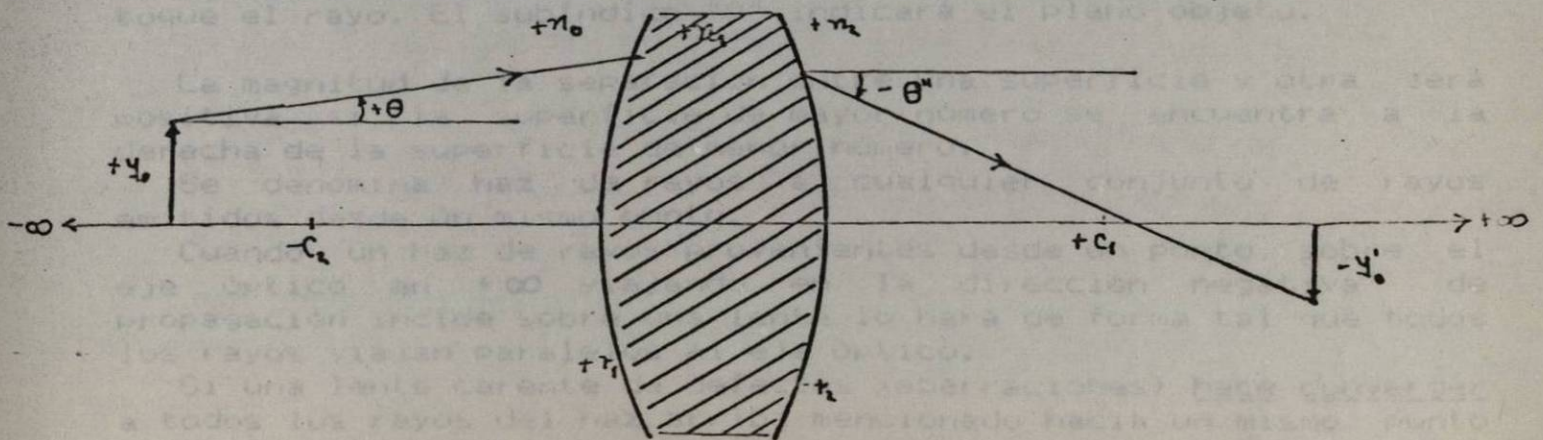


Fig. 1.4 Convención de signos.

3.- CONVENCION DE SIGNOS Y PUNTOS CARDINALES.

A continuación estableceremos una convención de signos y se definirán también los puntos cardinales de un sistema óptico los cuales son:

- 1.- Los puntos principales
- 2.- Los puntos nodales
- 3.- Los puntos focales.

Se dice que un rayo posee una dirección de propagación **positiva** cuando viaja de izquierda a derecha; en caso contrario poseerá una dirección de propagación **negativa**.

Se llama **curvatura** de una superficie óptica al inverso de su radio de curvatura, esto es:

$$c = 1/r \quad (1.6)$$

donde r se refiere al radio de curvatura de la superficie en cuestión.

La magnitud de la curvatura o del radio de curvatura de una superficie será **positiva** cuando el centro de curvatura de la superficie en cuestión este a la derecha de la misma y **negativa** cuando se encuentre a su izquierda.

La **altura** de un rayo en cualquier plano perpendicular al eje óptico es la distancia del punto de intersección del rayo y el plano medida sobre éste.

La magnitud de cualquier altura será **positiva** cuando se mida a partir del eje óptico hacia arriba y **negativa** en caso contrario.

La magnitud del ángulo de propagación de un rayo, siempre se medirá con respecto al eje óptico y será **positiva** cuando se mida a partir del eje óptico hacia el rayo, siguiendo un giro en la dirección opuesta a las manecillas del reloj y **negativa** en caso contrario.

Los **índices de refracción** serán **positivos** si el rayo atraviesa el sistema óptico en la dirección positiva; serán **negativos** en el caso contrario.

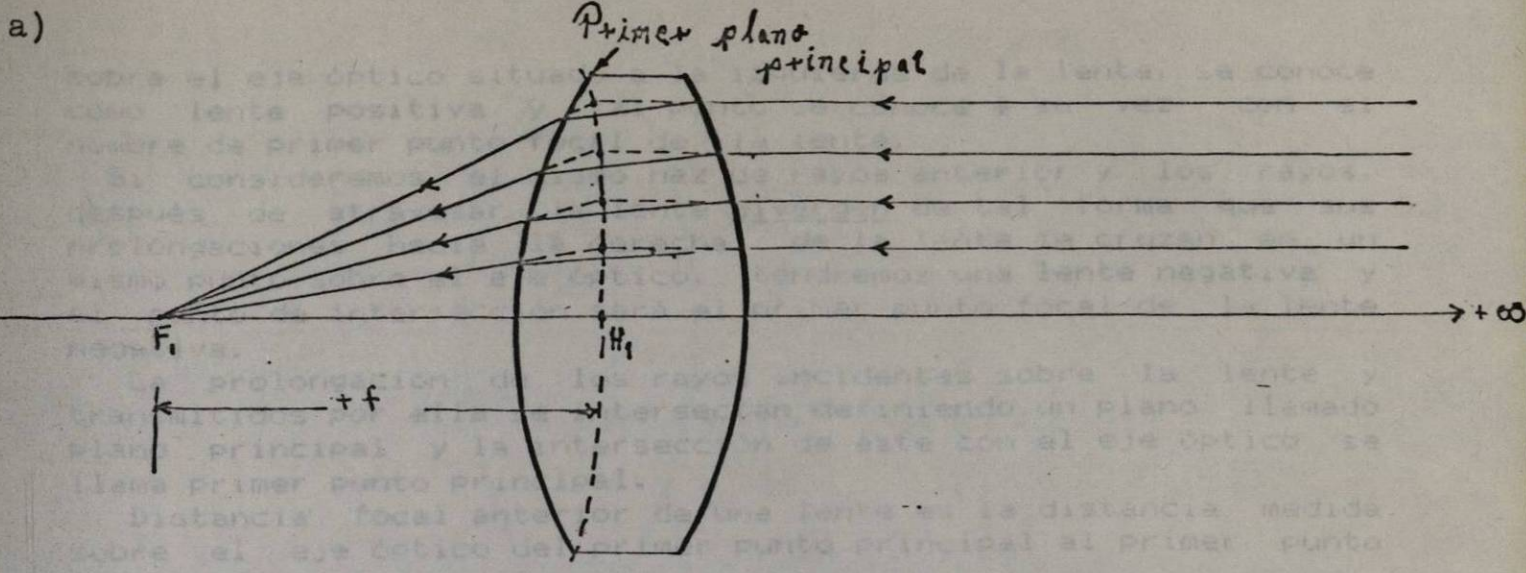
Las superficies de un sistema óptico se enumeran en forma ascendente siguiendo el orden definido por el sentido de propagación de un rayo al atravesar el sistema óptico, correspondiendo el número uno para la primera superficie y el k -ésimo número para la última superficie del sistema óptico que toque el rayo. El subíndice "0" indicará el plano objeto.

La magnitud de la **separación** entre una superficie y otra será **positiva** si la superficie de mayor número se encuentra a la derecha de la superficie de menor número.

Se denomina **haz de rayos** a cualquier conjunto de rayos emitidos desde un mismo punto.

Cuando un haz de rayos provenientes desde un punto sobre el eje óptico en $+\infty$ viajando en la dirección **negativa** de propagación incide sobre una lente lo hará de forma tal que todos los rayos viajan paralelos al eje óptico.

Si una lente carente de defectos (aberraciones) **hace converger** a todos los rayos del haz arriba mencionado hacia un mismo punto



De lo antes dicho, podemos resumir lo siguiente:

La distancia focal de una lente será de signo positivo si el haz de rayos converge en un punto situado a la izquierda del primer punto principal. Si la distancia focal es negativa cuando el haz de rayos converge en un punto situado a la derecha del primer punto principal.

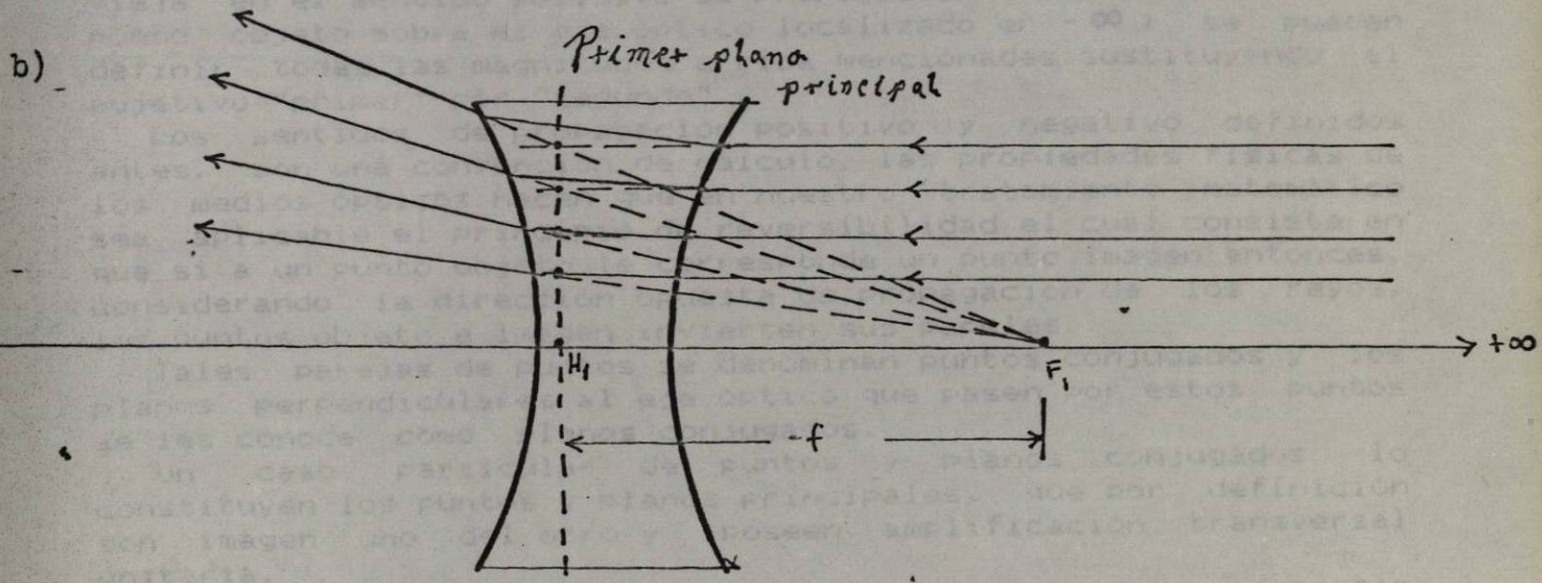


Fig. 1.5 Focos y planos principales; en a) lente positiva, b) lente negativa. F_1 es el primer punto focal y f es la distancia focal principal, H_1 es el primer punto principal.

sobre el eje óptico situado a la izquierda de la lente, se conoce como lente positiva y tal punto se conoce a su vez con el nombre de primer punto focal de la lente.

Si consideramos el mismo haz de rayos anterior y los rayos, después de atravesar la lente divergen de tal forma que sus prolongaciones hacia la derecha de la lente se cruzan en un mismo punto sobre el eje óptico, tendremos una lente negativa y el punto de intersección será el primer punto focal de la lente negativa.

La prolongación de los rayos incidentes sobre la lente y transmitidos por ella se intersectan definiendo un plano llamado plano principal y la intersección de éste con el eje óptico se llama primer punto principal.

Distancia focal anterior de una lente es la distancia medida sobre el eje óptico del primer punto principal al primer punto focal.

De lo antes dicho, podemos resumir lo siguiente:

La distancia focal de una lente será de magnitud positiva si el punto hacia donde converge el haz de rayos mencionado se encuentra a la izquierda del primer punto principal; la magnitud de la distancia focal será negativa cuando suceda que el punto de convergencia de los rayos del haz se encuentre a la derecha del primer punto principal.

Si el haz de rayos incidente en forma paralela al eje óptico viaja en el sentido positivo de propagación (fué emitido por un punto objeto sobre el eje óptico localizado en $-\infty$) se pueden definir todas las magnitudes arriba mencionadas sustituyendo el adjetivo "primer" por "segundo".

Los sentidos de propagación positivo y negativo definidos antes, son una convención de cálculo, las propiedades físicas de los medios ópticos hacen que en nuestro tratamiento matemático sea aplicable el principio de reversibilidad el cual consiste en que si a un punto objeto le corresponde un punto imagen entonces, considerando la dirección opuesta de propagación de los rayos, los puntos objeto e imagen invierten sus papeles.

Tales parejas de puntos se denominan puntos conjugados y los planos perpendiculares al eje óptico que pasen por estos puntos se les conoce como planos conjugados.

Un caso particular de puntos y planos conjugados lo constituyen los puntos y planos principales, que por definición son imagen uno del otro y poseen amplificación transversal unitaria.

De todos los rayos que pasan a través de una lente, a partir de un punto objeto fuera del eje óptico hacia su correspondiente punto imagen, siempre habrá uno para el cual la dirección del rayo en el espacio imagen será la misma que en el espacio objeto; es decir, los segmentos de los rayos antes y después de atravesar la lente son paralelos.

Si prolongamos estos segmentos, los puntos de intersección con el eje óptico son llamados los puntos nodales y a los planos transversos en ellos se les llama los planos nodales (fig. 1.7).

Si a ambos lados de la lente se tiene el mismo medio físico, entonces los puntos nodales y los puntos principales coinciden y además, las distancias focales efectivas son del mismo valor.

sobre el eje óptico situado a la izquierda de la lente, se conoce como lente positiva y tal punto se conoce a su vez con el nombre de primer punto focal de la lente.

Si consideramos el mismo haz de rayos anterior y los rayos, después de atravesar la lente divergen de tal forma que sus prolongaciones hacia la derecha de la lente se cruzan en un mismo punto sobre el eje óptico, tendremos una lente negativa y el punto de intersección será el primer punto focal de la lente negativa.

La prolongación de los rayos incidentes sobre la lente y transmitidos por ella se intersectan definiendo un plano llamado plano principal y la intersección de éste con el eje óptico se llama primer punto principal.

Distancia focal anterior de una lente es la distancia medida sobre el eje óptico del primer punto principal al primer punto focal.

De lo antes dicho, podemos resumir lo siguiente:

La distancia focal de una lente será de magnitud positiva si el punto hacia donde converge el haz de rayos mencionado se encuentra a la izquierda del primer punto principal; la magnitud de la distancia focal será negativa cuando suceda que el punto de convergencia de los rayos del haz se encuentre a la derecha del primer punto principal.

Si el haz de rayos incidente en forma paralela al eje óptico viaja en el sentido positivo de propagación (fué emitido por un punto objeto sobre el eje óptico localizado en $-\infty$) se pueden definir todas las magnitudes arriba mencionadas sustituyendo el adjetivo "primer" por "segundo".

Los sentidos de propagación positivo y negativo definidos antes, son una convención de cálculo, las propiedades físicas de los medios ópticos hacen que en nuestro tratamiento matemático sea aplicable el principio de reversibilidad el cual consiste en que si a un punto objeto le corresponde un punto imagen entonces, considerando la dirección opuesta de propagación de los rayos, los puntos objeto e imagen invierten sus papeles.

Tales parejas de puntos se denominan puntos conjugados y los planos perpendiculares al eje óptico que pasen por estos puntos se les conoce como planos conjugados.

Un caso particular de puntos y planos conjugados lo constituyen los puntos y planos principales, que por definición son imagen uno del otro y poseen amplificación transversal unitaria.

De todos los rayos que pasan a través de una lente, a partir de un punto objeto fuera del eje óptico hacia su correspondiente punto imagen, siempre habrá uno para el cual la dirección del rayo en el espacio imagen será la misma que en el espacio objeto; es decir, los segmentos de los rayos antes y después de atravesar la lente son paralelos.

Si prolongamos estos segmentos, los puntos de intersección con el eje óptico son llamados los puntos nodales y a los planos transversos en ellos se les llama los planos nodales (fig. 1.7).

Si a ambos lados de la lente se tiene el mismo medio físico, entonces los puntos nodales y los puntos principales coinciden y además, las distancias focales efectivas son del mismo valor.

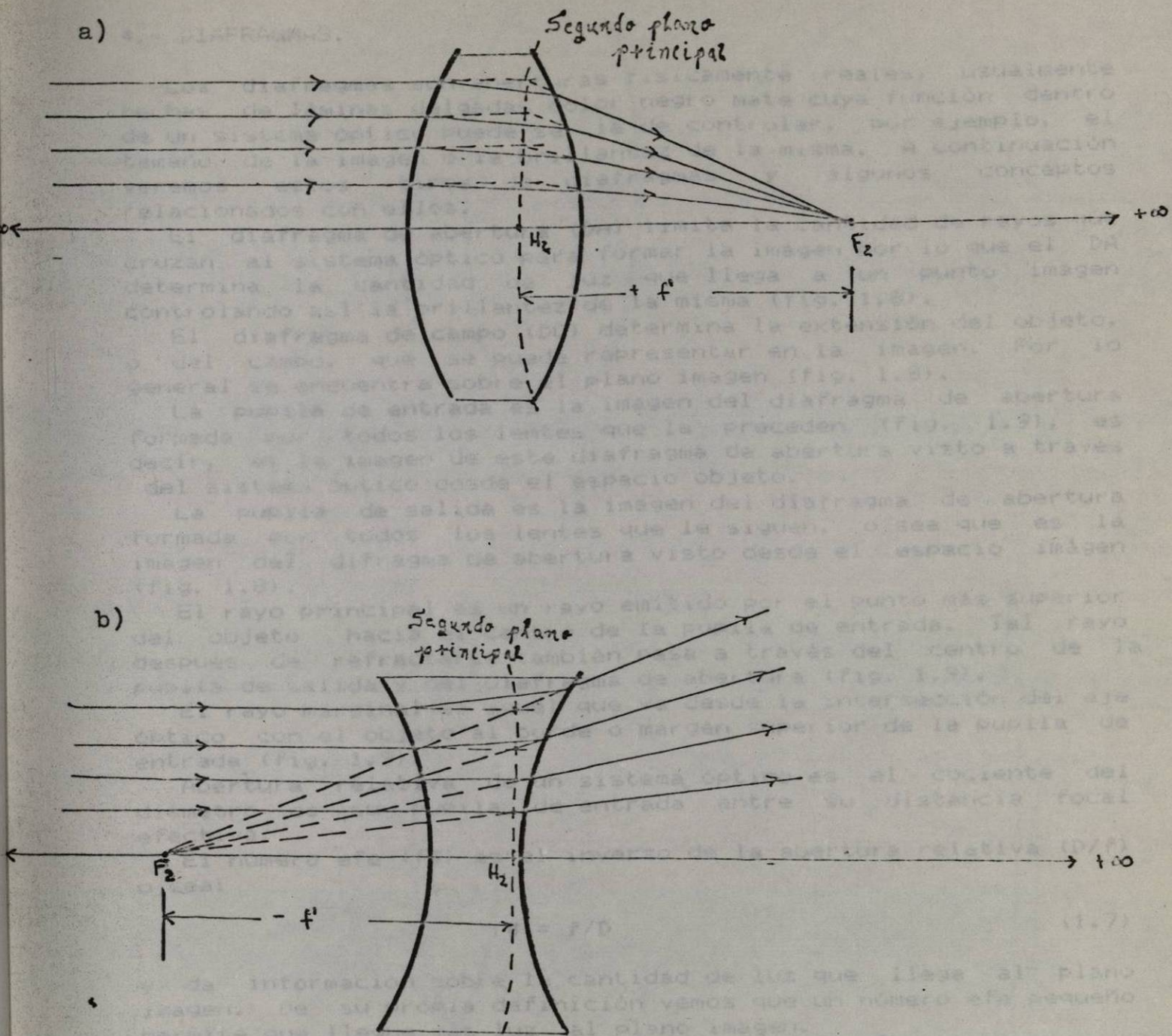


Fig. 1.6 Focos y planos principales; en a) lente positiva, b) lente negativa. H_2 es el segundo punto principal, F_2 es el punto focal secundario y f' es la distancia focal secundaria.

4.- DIAFRAGMAS.

Los diafragmas son aberturas físicamente reales, usualmente hechas de láminas delgadas color negro mate cuya función dentro de un sistema óptico puede ser la de controlar, por ejemplo, el tamaño de la imagen o la brillantez de la misma. A continuación veremos estos tipos de diafragmas y algunos conceptos relacionados con ellos.

El diafragma de abertura (DA) limita la cantidad de rayos que cruzan al sistema óptico para formar la imagen por lo que el DA determina la cantidad de luz que llega a un punto imagen controlando así la brillantez de la misma (fig. 1.8).

El diafragma de campo (DC) determina la extensión del objeto, o del campo, que se puede representar en la imagen. Por lo general se encuentra sobre el plano imagen (fig. 1.8).

La pupila de entrada es la imagen del diafragma de abertura formada por todos los lentes que la preceden (fig. 1.9), es decir, es la imagen de este diafragma de abertura visto a través del sistema óptico desde el espacio objeto.

La pupila de salida es la imagen del diafragma de abertura formada por todos los lentes que le siguen, o sea que es la imagen del diafragma de abertura visto desde el espacio imagen (fig. 1.8).

El rayo principal es un rayo emitido por el punto más superior del objeto hacia el centro de la pupila de entrada. Tal rayo después de refractarse también pasa a través del centro de la pupila de salida y del diafragma de abertura (fig. 1.9).

El rayo marginal es aquel que va desde la intersección del eje óptico con el objeto al borde o margen superior de la pupila de entrada (fig. 1.9).

Abertura relativa de un sistema óptico es el cociente del diámetro de su pupila de entrada entre su distancia focal efectiva.

El número efe ($f\#$) es el inverso de la abertura relativa (D/f) o sea:

$$f\# = f/D \quad (1.7)$$

y da información sobre la cantidad de luz que llega al plano imagen. De su propia definición vemos que un número efe pequeño permite que llegue más luz al plano imagen.

El poder dióptrico o potencia de una lente (Φ) está definido como el recíproco de su distancia focal (f). Cuando f está en metros, Φ está en dioptrías.

$$\Phi = 1/f \quad (1.8)$$

Para una superficie esférica con un radio de curvatura r , que se encuentre entre dos medios ópticos de índices de refracción n y n' (según la figura 1.10) tenemos que su potencia (Φ) está dada por:

$$\Phi = (n' - n)/r \quad (1.9)$$

mientras que para una lente cuyas superficies tienen radios de

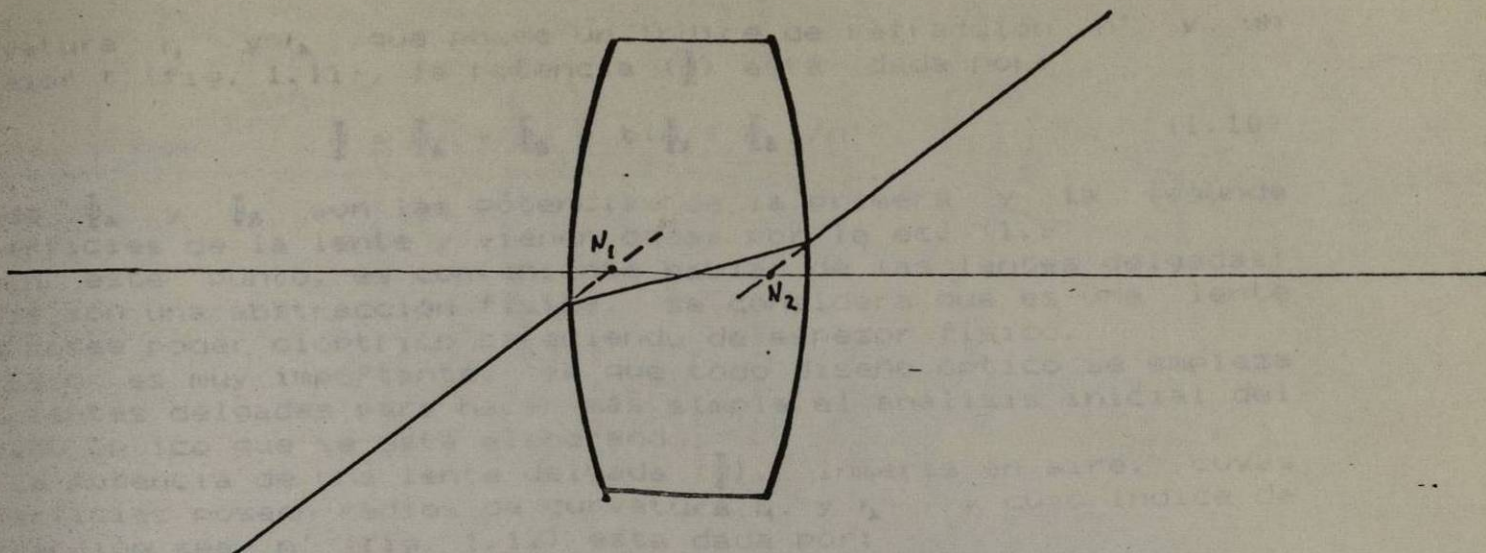


Fig. 1.7 Puntos nodales. N_1 es el primer punto nodal y N_2 es el segundo punto nodal.

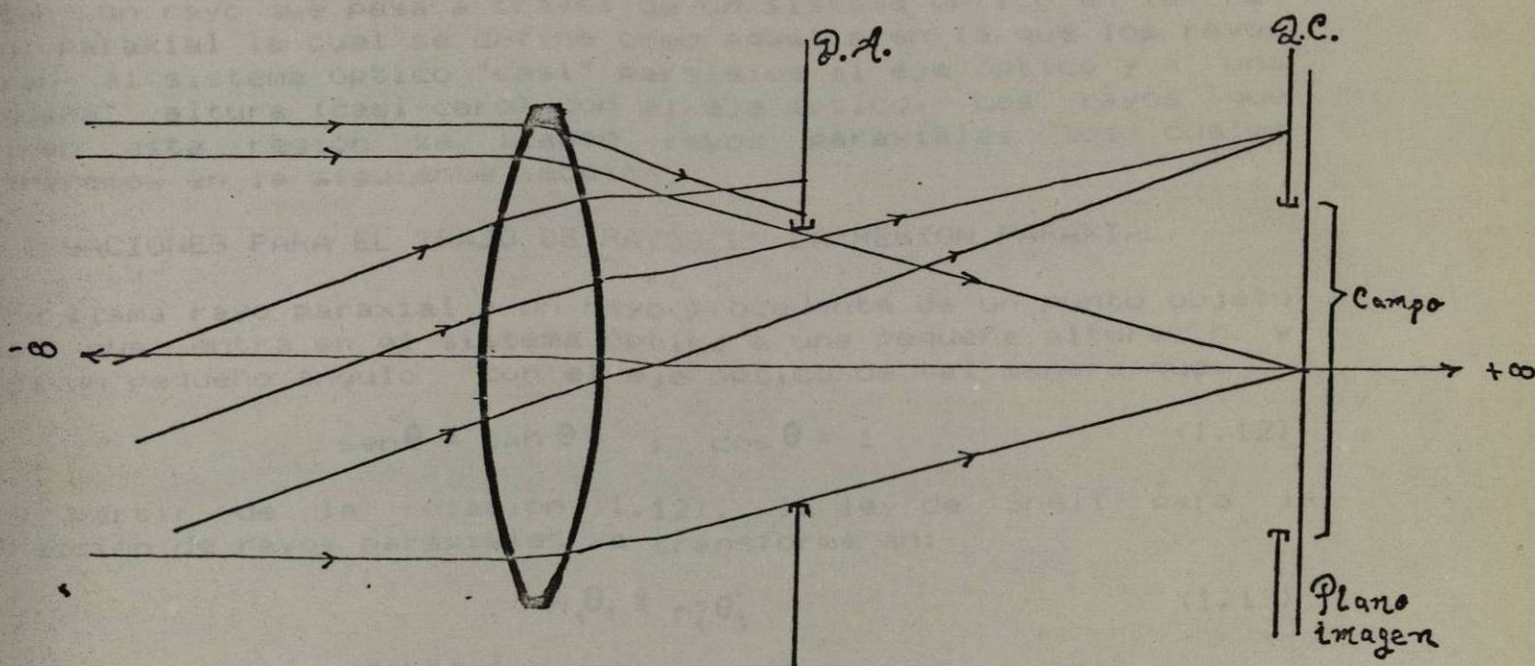


Fig. 1.8 Diafragmas de abertura (D.A.) y de campo (D.C.).

curvatura r_1 y r_2 , que posee un índice de refracción n' y un espesor t (fig. 1.11), la potencia (\bar{F}) está dada por:

$$\bar{F} = \bar{F}_A + \bar{F}_B - t(\bar{F}_A * \bar{F}_B)/n' \quad (1.10)$$

donde \bar{F}_A y \bar{F}_B son las potencias de la primera y la segunda superficies de la lente y vienen dadas por la ec. (1.9).

En este punto, es conveniente hablar de las lentes delgadas; estas son una abstracción física, se considera que es una lente que posee poder dióptrico careciendo de espesor físico.

Esto es muy importante, ya que todo diseño óptico se empieza con lentes delgadas para hacer más simple el análisis inicial del diseño óptico que se esté elaborando.

La potencia de una lente delgada (\bar{F}), inmersa en aire, cuyas superficies poseen radios de curvatura r_1 y r_2 , y cuyo índice de refracción sea n' (fig. 1.12) está dada por:

$$\bar{F} = (n'-1)(c_1 - c_2) \quad (1.11)$$

donde c_1 y c_2 son los valores de las curvaturas de las superficies de la lente dadas por la ec. 1.6.

A continuación haremos un análisis de las ecuaciones que describen un rayo que pasa a través de un sistema óptico en la región paraxial la cual se define como aquella en la que los rayos entran al sistema óptico "casi" paralelos al eje óptico y a una "pequeña" altura (casi cero) con el eje óptico. Los rayos que definen esta región se llaman rayos paraxiales los cuales definiremos en la siguiente sección.

5.- ECUACIONES PARA EL TRAZO DE RAYOS EN LA REGION PARAXIAL.

Se llama rayo paraxial a un rayo procedente de un punto objeto axial que entra en el sistema óptico a una pequeña altura h y forma un pequeño ángulo con el eje óptico de tal manera que:

$$\text{sen } \theta \approx \tan \theta \approx \theta; \quad \cos \theta \approx 1 \quad (1.12)$$

A partir de la relación (1.12), la ley de Snell para la refracción de rayos paraxiales se transforma en:

$$n_1 \theta_1 \approx n_1' \theta_1' \quad (1.13)$$

ya que al cumplirse (1.12) se cumple que:

$$\text{sen } \theta \approx \theta; \quad \text{sen } \theta' \approx \theta' \quad (1.14)$$

Aplicando la ley de Snell (ec. 1.2) para el rayo que llega al punto P1 de la fig. 1.13:

$$n_1 \theta_1 = n_1' \theta_1' \quad (1.15)$$

de la misma figura vemos que la ec. 1.15 se puede expresar como:

$$n_1 (v_1 + v_0) = n_1' (v_1' + v_0) \quad (1.16)$$

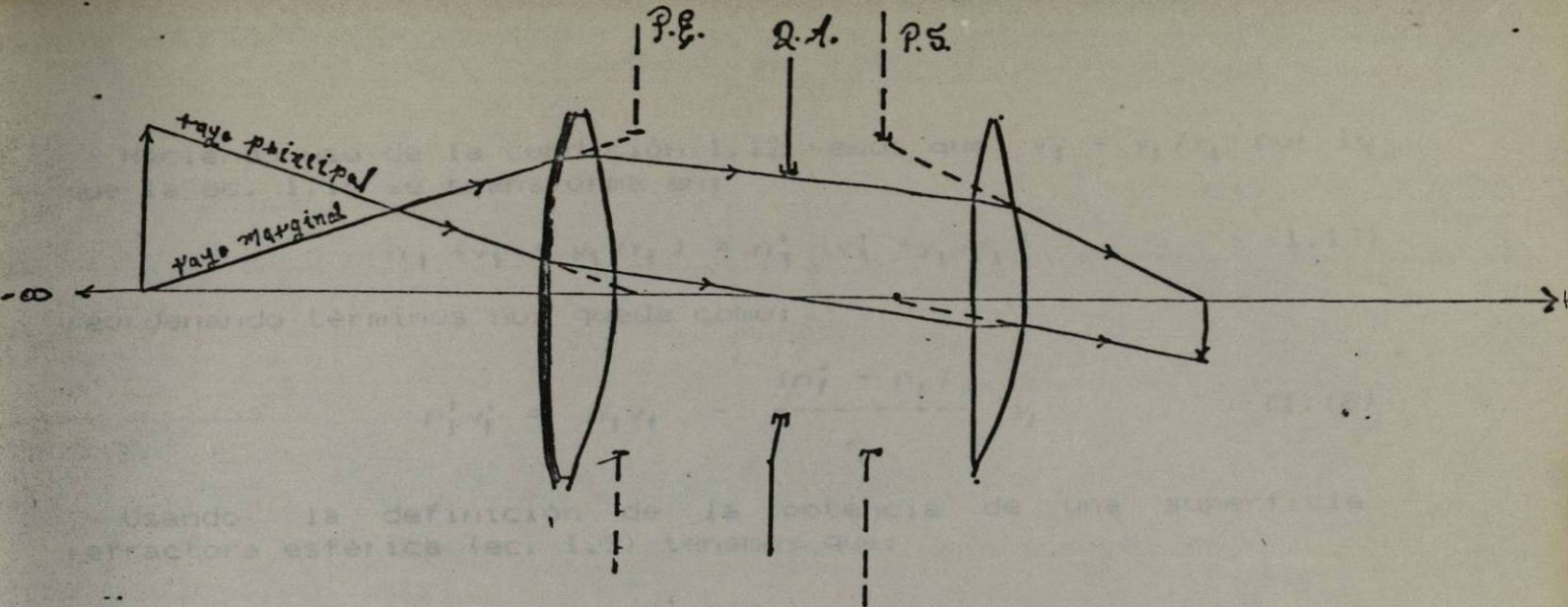


Fig. 1.9 Pupilas de entrada (P.E.) y de salida (P.S.); rayos principal y marginal.

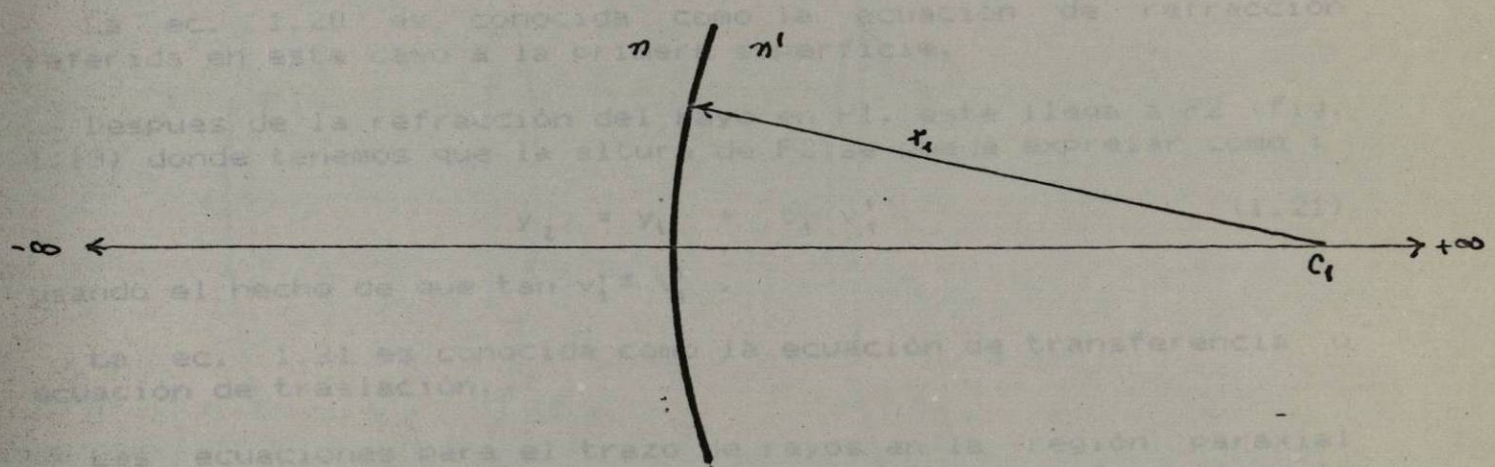


Fig. 1.10 Potencia de una superficie refractora esférica.

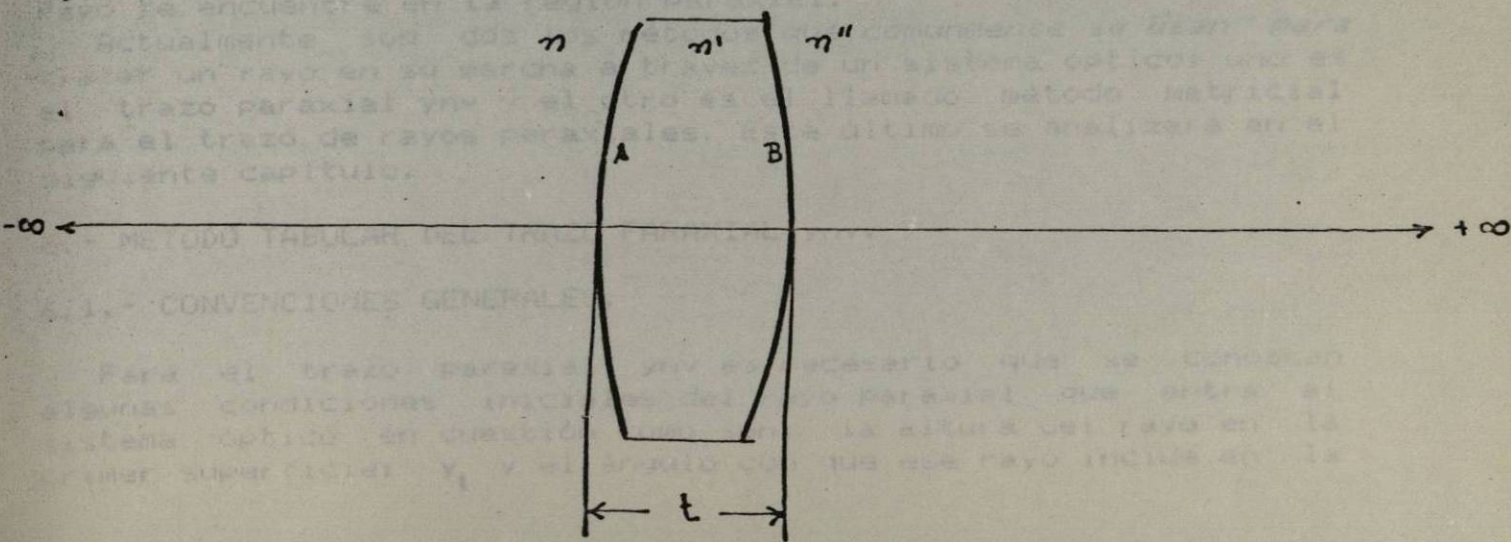


Fig. 1.11 Potencia de una lente gruesa.

Haciendo uso de la condición 1.12 vemos que $v_1 = y_1/r_1$ por lo que la ec. 1.16 se transforma en:

$$n_1 (v_1 + y_1/r_1) = n_1' (v_1' + y_1/r_1) \quad (1.17)$$

reordenando términos nos queda como:

$$n_1' v_1' = n_1 v_1 - \frac{(n_1' - n_1)}{r_1} y_1 \quad (1.18)$$

Usando la definición de la potencia de una superficie refractora esférica (ec. 1.9) tenemos que:

$$\bar{F}_1 = \frac{(n_1' - n_1)}{r_1} \quad (1.19)$$

Expresando la ec. 1.18 con esta definición obtenemos:

$$n_1' v_1' = n_1 v_1 - \bar{F}_1 y_1 \quad (1.20)$$

La ec. 1.20 es conocida como la ecuación de refracción referida en este caso a la primera superficie.

Después de la refracción del rayo en P1, este llega a P2 (fig. 1.13) donde tenemos que la altura de P2 se puede expresar como:

$$y_2 = y_1 + t_1 v_1' \quad (1.21)$$

usando el hecho de que $\tan v_1' \approx v_1'$.

La ec. 1.21 es conocida como la ecuación de transferencia o ecuación de traslación.

Las ecuaciones para el trazo de rayos en la región paraxial desarrolladas en este capítulo, las ecuaciones de refracción y la de transferencia, nos dan las relaciones matemáticas necesarias para poder "seguir" la marcha de un rayo a través de un sistema óptico centrado y de superficies esféricas siempre y cuando el rayo se encuentre en la región paraxial.

Actualmente son dos los métodos que comúnmente se usan para trazar un rayo en su marcha a través de un sistema óptico: uno es el trazo paraxial ynv y el otro es el llamado método matricial para el trazo de rayos paraxiales. Este último se analizará en el siguiente capítulo.

6.- METODO TABULAR DEL TRAZO PARAXIAL ynv.

6.1.- CONVENCIONES GENERALES.

Para el trazo paraxial ynv es necesario que se conozcan algunas condiciones iniciales del rayo paraxial que entra al sistema óptico en cuestión como son: la altura del rayo en la primera superficie: y_1 y el ángulo con que ese rayo incide en la

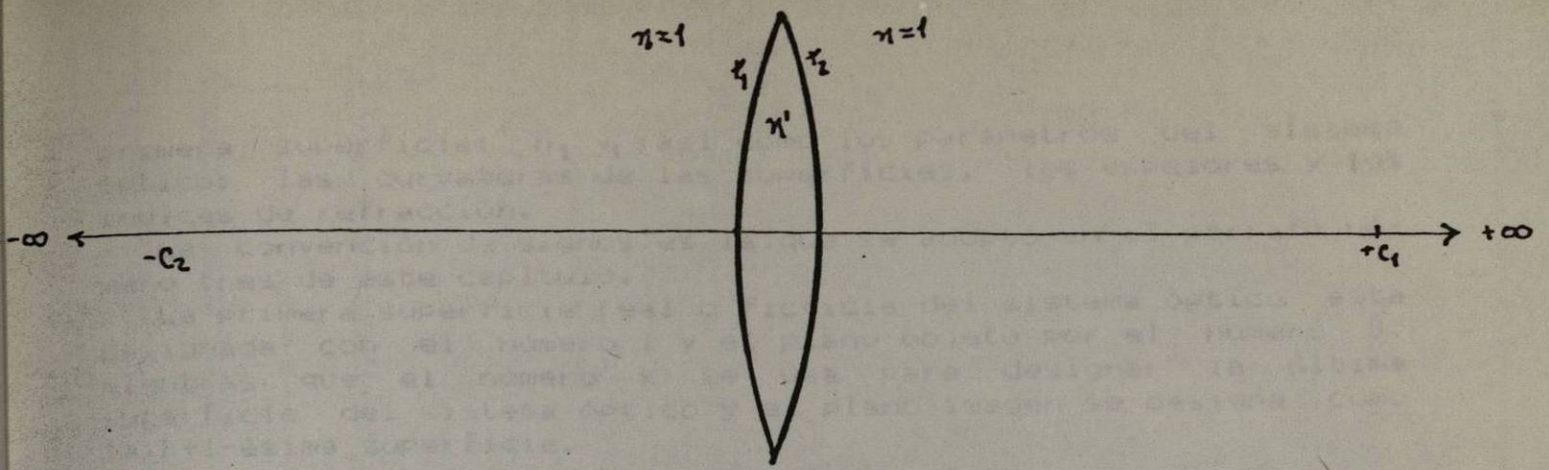


Fig. 1.12 Potencia de una lente delgada inmersa en aire.

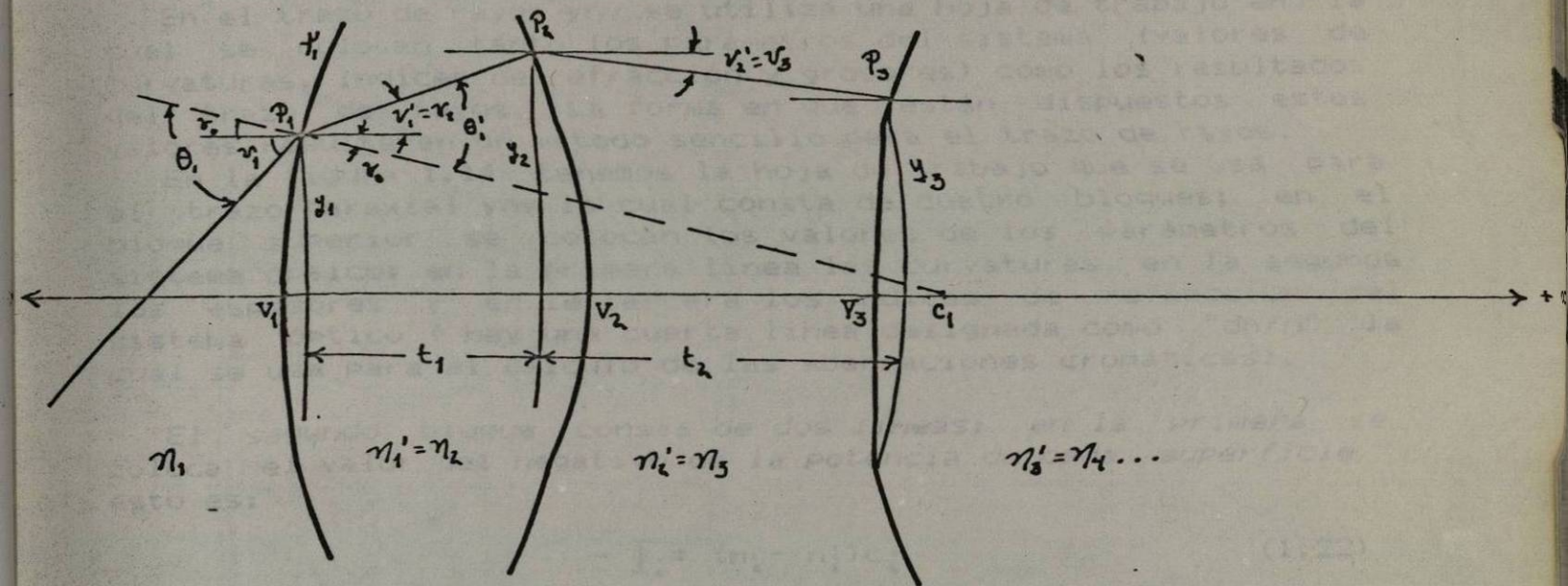


Fig. 1.13 Trazo de rayos en la región paraxial. En esta figura se han exagerado las dimensiones.

primera superficie: n_1, v_1 ; así como los parámetros del sistema óptico: las curvaturas de las superficies, los espesores y los índices de refracción.

La convención de signos es la que se adoptó en el párrafo número tres de este capítulo.

La primera superficie real o ficticia del sistema óptico está designada con el número 1 y el plano objeto por el número 0, mientras que el número k se usa para designar la última superficie del sistema óptico y el plano imagen se designa como la $k+1$ -ésima superficie.

Las cantidades no primadas se refieren a magnitudes antes de cualquier superficie, mientras que las cantidades primadas aluden a las magnitudes después de ella.

A continuación explicaremos el uso del método tabular del trazo paraxial ynv.

5.2.- HOJA DE TRABAJO PARA EL TRAZO ynv.

En el trazo de rayos ynv se utiliza una hoja de trabajo en la cual se colocan tanto los parámetros del sistema (valores de curvaturas, índices de refracción y grosores) como los resultados del trazo de rayos. La forma en que están dispuestos estos valores resulta en un método sencillo para el trazo de rayos.

En la figura 1.14 tenemos la hoja de trabajo que se usa para el trazo paraxial ynv la cual consta de cuatro bloques; en el bloque superior se colocan los valores de los parámetros del sistema óptico: en la primera línea las curvaturas, en la segunda los espesores y en la tercera los índices de refracción del sistema óptico (hay una cuarta línea designada como "dn/n" la cual se usa para el cálculo de las aberraciones cromáticas).

El segundo bloque consta de dos líneas: en la primera se coloca el valor del negativo de la potencia de cada superficie, esto es:

$$- \bar{\Phi}_i = (n_i - n_{i-1}) c_i \quad (1.22)$$

dada por la ecuación 1.9; en la segunda línea se calculan los valores del cociente de cada espesor (t_i) entre su índice de refracción correspondiente (n_i):

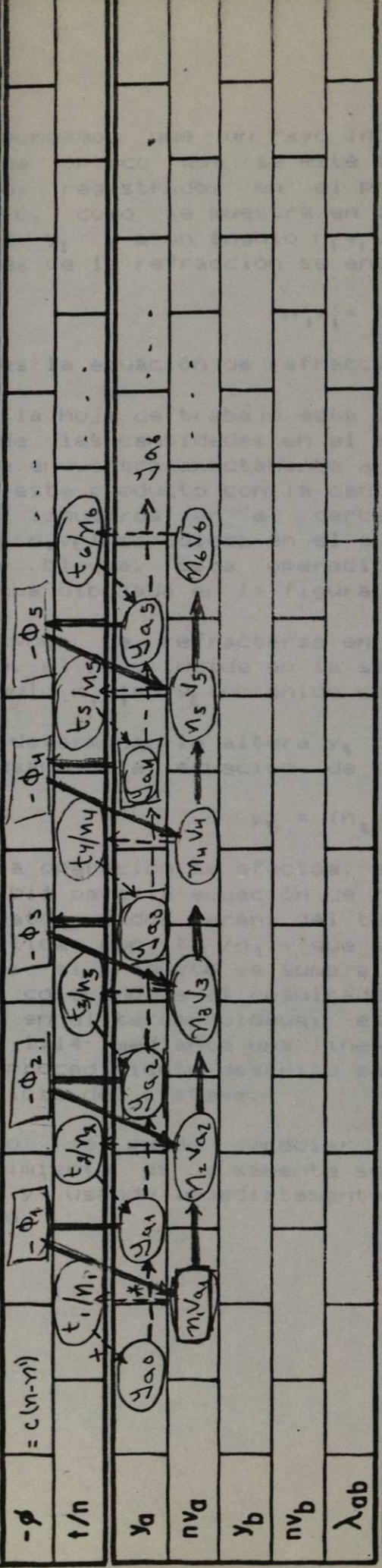
$$t_i / n_i \quad i=1,2,\dots,k \quad (1.23)$$

este cociente se llama espesor reducido.

En el tercer bloque se colocarán los valores de las alturas (y_i) y los ángulos ($n_i v_i$) del rayo al atravesar el sistema calculados mediante las ecuaciones de refracción y de transferencia. Finalmente, en el último bloque se tiene un espacio en blanco el cual sirve para dibujar el sistema que estamos analizando en la hoja de trabajo o bien para el cálculo de las aberraciones.

Ahora veremos como es que la forma en que están colocados los datos en la hoja de trabajo facilitan el uso de las ecuaciones de refracción y de transferencia.

t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	...
n_1	n_2	n_3	n_4	n_5	...
dn/n					



Supongamos que un rayo incide en la primera superficie del sistema óptico que se esté analizando y cuyos parámetros ya tenemos registrados en el primer bloque de nuestra hoja de trabajo, como se muestra en la figura 1.14, y que lo hace a una altura y_1 y a un ángulo $n_1 v_1$. La dirección que sigue el rayo después de la refracción se encuentra aplicando:

$$n_1'v_1' = n_1v_1 - y_1 \bar{I}_1 \quad (1.20)$$

esta es la ecuación de refracción.

En la hoja de trabajo esta operación corresponde a multiplicar una de las cantidades en el tercer bloque (y_1) con la cantidad que se encuentra exactamente arriba en el segundo bloque ($-\bar{I}_1$) y sumar este producto con la cantidad que se encuentra medio cuadro a la izquierda en el tercer bloque ($n_1 v_1$); el resultado ($n_1'v_1' = n_2 v_2$) se coloca en el cuadro inmediato a la derecha en el tercer bloque. Esta operación se ilustra siguiendo la línea continua dibujada en la figura 1.14.

Después de refractarse en la primera superficie del sistema óptico, el rayo incide en la segunda superficie a una altura " y_2 " a un ángulo $n_1'v_1' = n_2 v_2$ (obtenido con la ecuación de refracción).

Para determinar la altura y_2 con que llega a la segunda superficie usamos la ecuación de transferencia según la cual:

$$y_2 = (n_2 v_2) t_1 / n_1 + y_1 \quad (1.21)$$

Esta operación se efectúa, en la hoja de trabajo, tal como se describió para la ecuación de refracción con la diferencia de que los datos usados serán: del tercer bloque, $n_2 v_2$, el cual se multiplica con t_1 / n_1 , que se encuentra arriba en el segundo bloque; el producto se suma a y_1 , que se encuentra en el tercer bloque colocándose el resultado: y_2 a la derecha del último dato usado en el tercer bloque; esta operación se representa en la figura 1.14 mediante una línea discontinua.

El procedimiento descrito se continúa hasta llegar a la última superficie del sistema.

Como se puede apreciar al hacer los cálculos, este procedimiento es sumamente sencillo escribiéndose un mínimo de datos y usando inmediatamente cada resultado en el siguiente cálculo.

CAPITULO II

METODO MATRICIAL DEL TRAZO PARAXIAL DE RAYOS.

1.- INTRODUCCION.

En este capítulo explicaremos el uso de matrices para el cálculo de la marcha de los rayos a través de un sistema óptico de superficies esféricas, centrado, siempre y cuando se trate de un rayo paraxial encontrando además una forma simple para el cálculo de las distancias focales y de los puntos principales en un sistema óptico.

El uso de matrices, si bien, no es un método muy eficiente para su uso en computadora (por ejemplo, es más rápido el cálculo del trazo de rayos mediante el uso del método tabular ymv por computadora) permite comprender mejor el trazo de rayos y algunas propiedades importantes de los sistemas ópticos.

No obstante la falta de rapidez existe la ventaja de que podemos verificar, paso a paso, si los cálculos realizados por la computadora no han introducido "errores" ya que el determinante de la matriz característica siempre debe ser igual a uno como veremos más adelante.

El método matricial para el trazo de rayos se basa en la ecuaciones de refracción y de transferencia.

2.- EL METODO MATRICIAL.

Lo primero que haremos será encontrar una representación matricial para la ecuación de refracción (ec. 1.19).

Si observamos esta ecuación y usamos el hecho de que $y_1 = y_1'$ (recordar que cuando ocurre una refracción no cambia la altura del rayo) podemos encontrar que la expresión matricial de la ecuación paraxial de refracción:

$$\begin{pmatrix} n_1' v_1' \\ y_1' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -\bar{\Phi}_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} n_1 v_1 \\ y_1 \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

da como resultado la ecuación de refracción y la identidad $y_1 = y_1'$

Dividiendo 1.19 por n_1' :

$$\begin{pmatrix} v_1' \\ y_1' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} n_1/n_1' & -\bar{\Phi}_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1 \\ y_1 \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

Podemos definir ahora que:

$$\mathcal{Y}_1' = \begin{pmatrix} n_1' v_1' \\ y_1' \end{pmatrix} \quad \text{y} \quad \mathcal{Y}_1 = \begin{pmatrix} n_1 v_1 \\ y_1 \end{pmatrix} \quad (2.3-a, b)$$

y :

$$R_1 = \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{n_1} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

donde R_1 es conocida como la matriz de refracción. Usando 2.3-a,b y 2.4, la ecuación 2.1 se escribe como:

$$r_1' = R_1 r_1 \quad (2.5)$$

El vector r_1 contiene la información del rayo antes de refractarse en la superficie 1 y r_1' contiene la información del rayo después de refractarse en la superficie 1. La matriz R_1 nos dará la información del poder refractor de la interfase.

Volviendo a la fig. 1.13 tenemos que :

$$n_2 v_2 = n_1' v_1' + 0 \quad (2.6)$$

y :

$$y_2 = t_1 v_1' + y_1 \quad (1.20)$$

La ecuación 1.20 es la ecuación matricial de transferencia.

Como antes las ec. 2.6 y 1.20 se pueden expresar en forma matricial como :

$$\begin{pmatrix} n_2 v_2 \\ y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ t_1/n_1' & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} n_1' v_1' \\ y_1' \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

definiendo ahora la matriz de traslación:

$$T_{21} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ t_1/n_1' & 1 \end{pmatrix} \quad (2.8)$$

Usando las ec. 2.3 y 2.8 tenemos que 2.7 se puede expresar como :

$$r_2 = T_{21} r_1' \quad (2.9)$$

donde T_{21} contiene la información de la traslación que experimenta el rayo al ir del punto P1 (r_1') en la primera superficie al punto P2 en la segunda superficie (r_2).

Sustituyendo la ec. 2.5 en la 2.9 tenemos que :

$$r_2 = T_{21} R_1 r_1 \quad (2.10)$$

Por el principio de superposición, tenemos que para k superficies :

$$\mathcal{V}'_k = (R_k \ T_{k,k-1} \ R_{k-1} \ \dots \ R_2 \ T_{21} \ R_1) \mathcal{V}_1 \quad (2.11)$$

donde los factores matriciales se deben multiplicar de derecha a izquierda.

Los factores matriciales entre paréntesis definen a la matriz característica del sistema:

$$M_{k1} = R_k \ T_{k,k-1} \ R_{k-1} \ \dots \ R_2 \ T_{21} \ R_1 \quad (2.12)$$

donde R_k se refiere a la última superficie refractora del sistema y R_1 a la primera superficie refractora.

En lo sucesivo, siempre que se emplee el subíndice k se está refiriendo a la última superficie refractora del sistema, como se dijo antes.

Para agregar la traslación del rayo \mathcal{V}_0 del plano objeto a la primera superficie refractora, \mathcal{V}_1 debe expresarse como:

$$\mathcal{V}_1 = T_{10} \mathcal{V}_0 \quad (2.13)$$

donde T_{10} contiene la información de la traslación.

Para aclarar esto último consideremos la fig. 2.1 donde P_0 es un punto del plano objeto y P_I es un punto del plano imagen.

La expresión para el vector rayo imagen del punto P_I imagen de P_0 esta dada por:

$$\mathcal{V}_I = T_{IK} M_{k1} T_{10} \mathcal{V}_0 \quad (2.14)$$

El operador M_{k1} transforma las características del rayo a través del sistema y finalmente, T_{IK} lo transfiere desde la última superficie del sistema hasta el plano imagen.

\mathcal{V}_I contiene toda la información del rayo en el plano imagen.

3.- PUNTOS CARDINALES OBTENIDOS POR EL METODO MATRICIAL

Ahora veamos la información que podemos obtener de la matriz característica del sistema M_{k1} , donde:

$$M_{k1} = \begin{pmatrix} a'_{k1} & b'_{k1} \\ c'_{k1} & d'_{k1} \end{pmatrix} \quad (2.15)$$

Los significados físicos de las componentes de la matriz M_{k1} se encuentran después de desarrollar alguna ecuación del tipo de la 2.14. Sin embargo solamente se establecerán aquí los resultados obtenidos en ese desarrollo por ser su deducción bastante extensa y no ser el propósito de este capítulo.

Refiriéndonos a la fig. 2.13 tenemos que las distancias focales f y f' vienen dadas por:

$$c'_{k1} = -\frac{n_0}{f} = -\frac{n_k}{f'} \quad (2.16)$$

La distancia del vértice de la primera superficie (V_1) al primer punto principal (H_1) esta dada por:

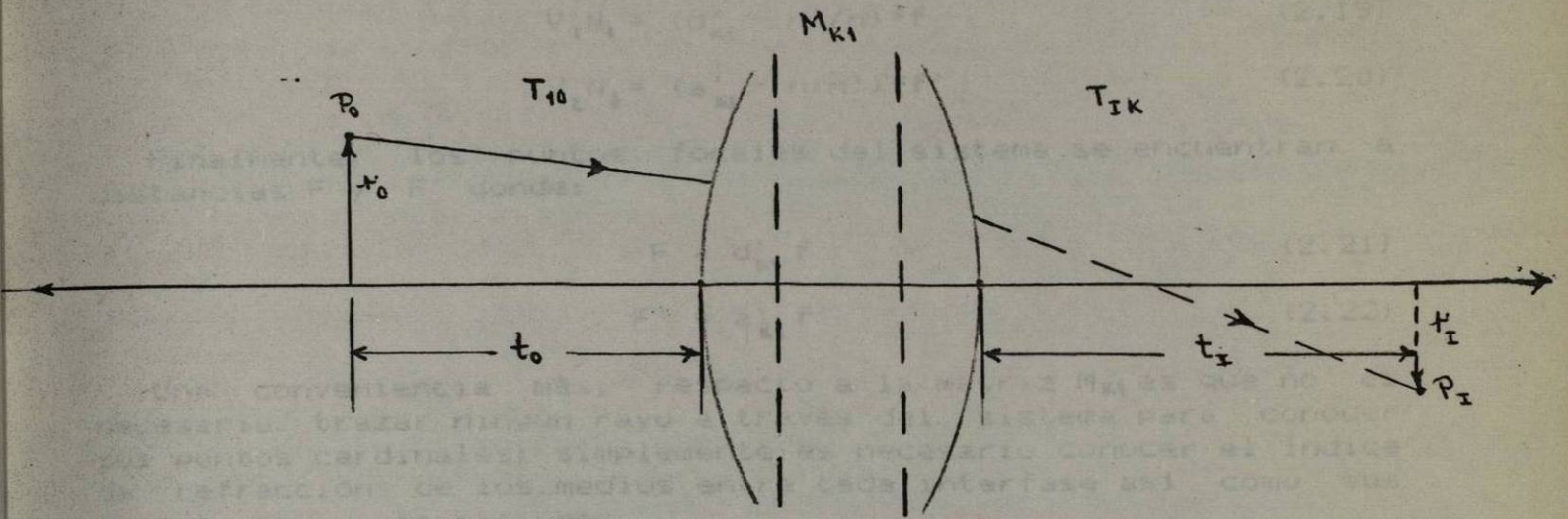


Fig. 2.1 Cálculo del rayo imagen, x_i , que viene del punto objeto P_o y que atravieza un sistema óptico cuya matriz característica es M_{K1} .

$$V_1 H_1 = (d'_{k1} - 1) * f = t p_1 \quad (2.17)$$

y la distancia del vértice de la última superficie (V_2) al segundo punto principal (H_2) esta dada por :

$$V_2 H_2 = (a'_{k1} - 1) * f' = t p_2 \quad (2.18)$$

Los puntos nodales se encuentran a distancias $V_1 N_1$ y $V_2 N_2$ de los vértices del sistema óptico dadas por:

$$V_1 N_1 = (d'_{k1} - n'/n) * f \quad (2.19)$$

$$V_2 N_2 = (a'_{k1} - n/n') * f' \quad (2.20)$$

Finalmente, los puntos focales del sistema se encuentran a distancias F y F' donde:

$$F = d'_{k1} f \quad (2.21)$$

$$F' = a'_{k1} f' \quad (2.22)$$

Una conveniencia más, respecto a la matriz M_{k1} es que no es necesario trazar ningún rayo a través del sistema para conocer sus puntos cardinales; simplemente es necesario conocer el índice de refracción de los medios entre cada interfase así como sus curvaturas y separaciones.

Si usamos expresiones del tipo: 2.11 ó 2.14 podemos seguir la marcha de un rayo a través del sistema.

En estos conceptos se basa el programa de computadora desarrollado en su parte para análisis del sistema óptico y el trazo de rayos, parte esencial para poder calcular, posteriormente, las aberraciones del sistema.

CAPITULO III

ABERRACIONES DE TERCER ORDEN

En este capítulo se tratarán las principales aberraciones de un sistema óptico desde el punto de vista de la teoría a tercer orden. En la teoría paraxial se tiene solo una aproximación de las características del sistema, por medio del trazo ynv de rayos.

A medida que se abandona esta región paraxial, los puntos imagen presentarán defectos llamados aberraciones. Los métodos que se siguen para reducir estas aberraciones hasta un mínimo tolerable de acuerdo a las especificaciones del diseño y permitir así una imagen satisfactoria es uno de los principales problemas de la óptica geométrica.

En esta parte del trabajo no se trata de dar una respuesta a este problema, simplemente se presentan los diferentes tipos de aberraciones desde un punto de vista relativamente simple como lo es la teoría de tercer orden la cual proporciona una muy buena aproximación en la mayoría de los casos, del valor de las aberraciones más importantes en un sistema óptico.

Se introducirán algunos conceptos que no se presentaron en el capítulo primero por considerar que su uso está más justificado en el presente capítulo.

Las aberraciones que existen en un sistema óptico independientemente del color de la luz y por tanto de la dispersión de los medios físicos se conocen con el nombre de aberraciones MONOCROMATICAS, mientras que las aberraciones debidas al carácter policromático de la luz se les llaman aberraciones CROMATICAS.

Trataremos a continuación estos dos conjuntos de aberraciones.

A.- ABERRACIONES MONOCROMATICAS (Aberraciones de Seidel).

En la región paraxial, un punto objeto forma siempre un solo punto imagen; al salir de esta aproximación este hecho no es real pues un punto objeto puede tener más de un punto imagen ubicados en diferentes posiciones lo cual produce las aberraciones o defectos de imagen.

Cuando se trabajó en la región paraxial para el trazo de rayos asumimos que:

$$\text{sen } \theta \approx \theta \quad (1.11)$$

Una expansión del $\text{sen } \theta$ en una serie de Maclaurin nos da :

$$\text{sen } \theta = \theta - \frac{\theta^3}{3!} + \frac{\theta^5}{5!} - \frac{\theta^7}{7!} + \frac{\theta^9}{9!} \dots \quad (3.1)$$

Para ángulos pequeños vemos que la serie converge rápidamente y como una primera aproximación (o sea, en la región paraxial):

sen $\theta = \theta$ despreciando los demás términos (Teoría de primer orden).

A partir de esta consideración se obtuvieron las fórmulas para el trazo de rayos en la región paraxial del capítulo I.

Cuando sustituimos los primeros dos términos de la serie (3.1) en las fórmulas para el trazo de rayos, los resultados obtenidos conforman lo que se conoce como la teoría de tercer orden la cual describe, con muy buena precisión, las principales aberraciones de un sistema. Existen cinco aberraciones primarias (esférica, coma, astigmatismo, curvatura de campo y distorsión) las cuales fueron estudiadas en detalle por vez primera por Ludwig von Seidel, conociéndose por esto como las aberraciones de Seidel.

1.- ABERRACION ESFERICA.

Para entender en que consiste la aberración esférica observemos el haz de rayos de la figura 3.1 el cual proviene de un punto objeto axial, esto es, situado en el eje óptico; después de que el haz se refracta en la superficie esférica, los rayos no se reúnen en un mismo punto, sino que cada rayo intersecta al eje óptico en diferentes puntos. La medida de la aberración esférica es la distancia que existe entre las posiciones del punto imagen que predice la teoría de primer orden y el que resulta de la teoría de tercer orden distinguiéndose dos tipos de aberración esférica.

El primero se conoce como aberración esférica longitudinal (AEL); esta es la distancia que hay entre los puntos de intersección de los rayos imagen paraxial y de tercer orden con el eje óptico como se muestra en la figura 3.1.

La máxima variación se obtiene con el rayo marginal y es por esto que en la práctica la aberración esférica se determina para el rayo marginal.

Como un resultado del uso de la teoría de tercer orden tenemos que la magnitud de la AEL esta dada por:

$$A. \text{ ESFERICA} = S_1 = \frac{n}{2n'} (n - n') y_a i_a^2 (i_a + v_a') \quad (3.2)$$

donde i_a es el ángulo paraxial de incidencia del rayo "a" (rayo marginal) sobre la superficie con respecto a la perpendicular a la superficie, y_a es la altura del rayo marginal en esa superficie y v_a' es el ángulo de salida del rayo marginal después de la refracción (fig. 3.1).

Cuando la AEL es positiva, el rayo marginal intersecta al eje óptico a la izquierda del punto imagen paraxial siendo de magnitud negativa en caso contrario.

Por otra parte tenemos que en el plano imagen paraxial los puntos de intersección de los rayos no coinciden con el eje óptico (hay que recordar que el haz de rayos proviene de un punto objeto axial) y esto produce la aberración esférica transversal (AET) la cual se aprecia en la figura 3.1.

Como consecuencia de la aberración esférica un punto objeto luminoso resulta con una imagen óptica en forma de un pequeño

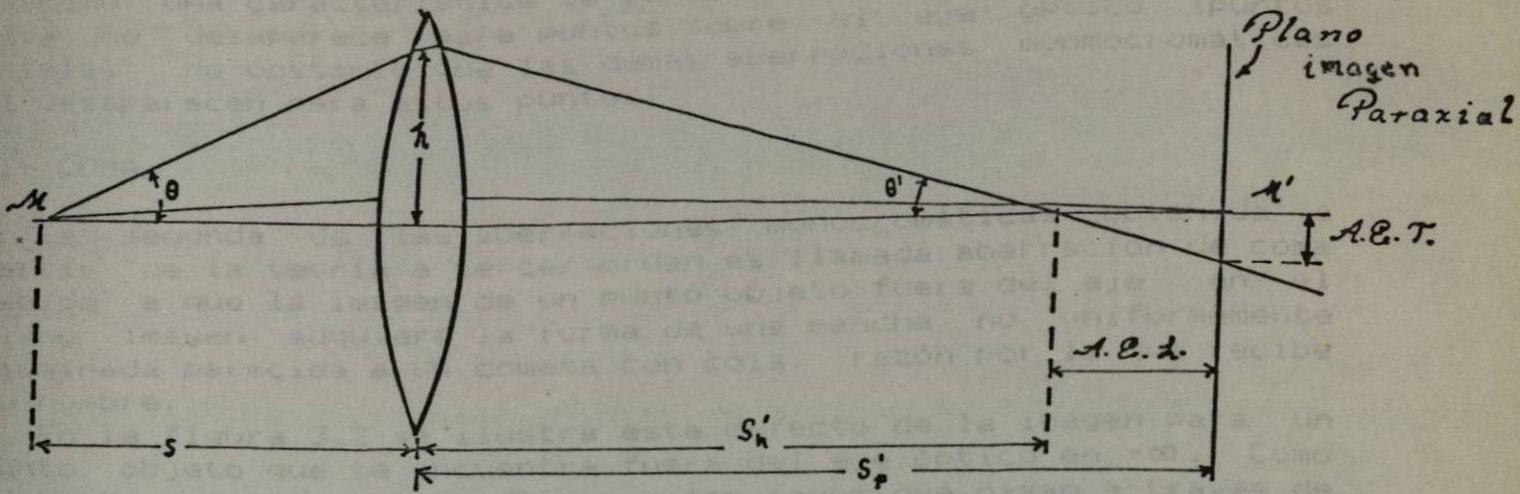


Fig. 3.1 Aberración esférica. Se muestra la aberración esférica lateral (A.E.L.) y la aberración esférica transversal (A.E.T.).

circulo llamado circulo de minima confucion el cual por lo general no esta iluminado uniformemente y cuyo radio es el valor de AET. En funcion de la AEL y el angulo de salida del rayo marginal, v'_a , tenemos:

$$AET = AEL \tan v'_a \quad (3.3)$$

Se dice que la AET es positiva si el rayo marginal intersecciona al plano imagen paraxial en un punto que se encuentra bajo el eje optico siendo de magnitud negativa en caso contrario.

Como una caracteristica de la aberracion esferica tenemos que esta no desaparece para puntos sobre el eje optico (puntos axiales) no obstante que las demas aberraciones monocromaticas si desaparecen para estos puntos.

2.- COMA.

La segunda de las aberraciones monocromaticas obtenida a partir de la teoria a tercer orden es llamada aberracion de coma debido a que la imagen de un punto objeto fuera del eje en el plano imagen adquiere la forma de una mancha no uniformemente iluminada parecida a un cometa con cola, razon por la que recibe su nombre.

En la figura 3.2 se ilustra este defecto de la imagen para un punto objeto que se encuentra fuera del eje optico en $-\infty$. Como se puede apreciar en esa figura, los rayos que pasan a traves de los bordes de la superficie (rayo marginal) caen muy juntos en el punto B' mientras que los del centro (rayo principal) caen en el punto A'. Es por esto que el plano focal parece que la amplificacion es diferente para diferentes sectores de la lente (fig. 3.2).

Si la amplificacion de los rayos de los puntos objeto fuera del eje, que entran al sistema por sus bordes, es mayor que la de los que entran al sistema por el centro, se dice que la coma es positiva mientras que si cumple lo contrario la coma se dice que es negativa.

La diferencia Δl que se aprecia en la fig. 3.2 entre los rayos principal y marginal, en el plano focal, definen la magnitud de la aberracion de coma.

La teoria de tercer orden muestra que la contribucion de una superficie esferica a la berracion de coma esta dada por:

$$A. COMA = S_2 = q S_1 \quad (3.3)$$

donde $q = i_b / i_a$, i_a es el angulo paraxial de incidencia del rayo marginal sobre la superficie, i_b es el angulo paraxial de incidencia del rayo "b" (rayo principal) sobre la superficie; ambos medidos con respecto a la normal a la superficie y S_1 es el valor de la aberracion esferica en esa superficie dada por la ecuacion 3.2 (fig. 3.3).

3.- ASTIGMATISMO.

Si el haz de rayos que proviene de un punto objeto incide sobre el sistema formando un angulo con el eje, entonces, este

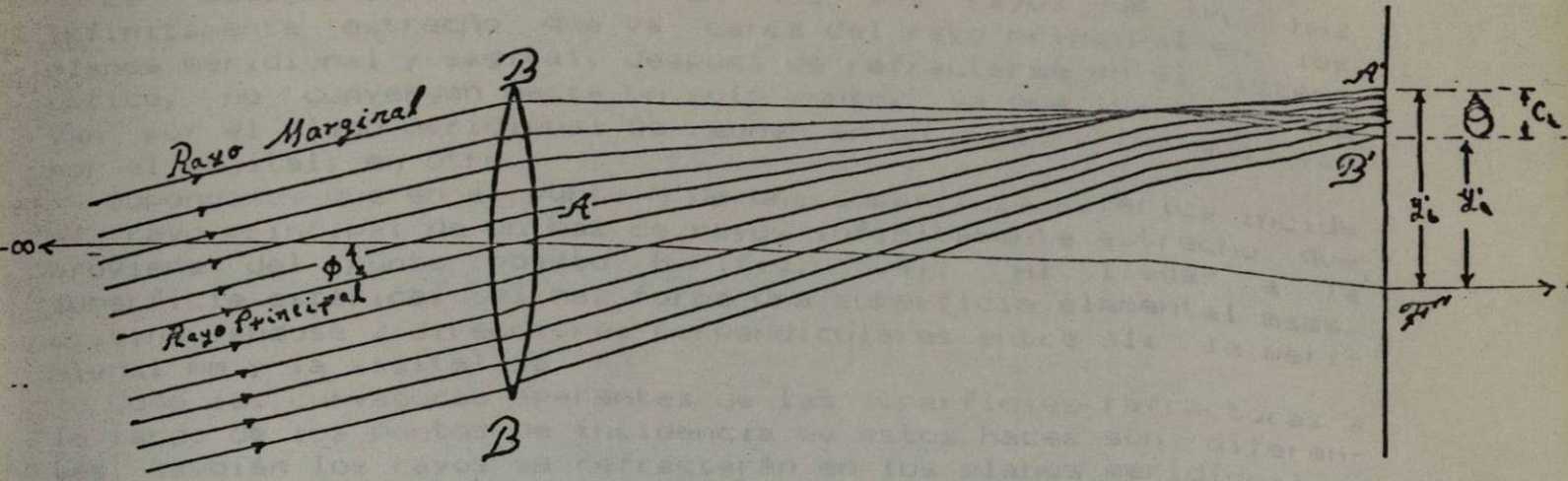


Fig. 3.2 Aberración de coma.

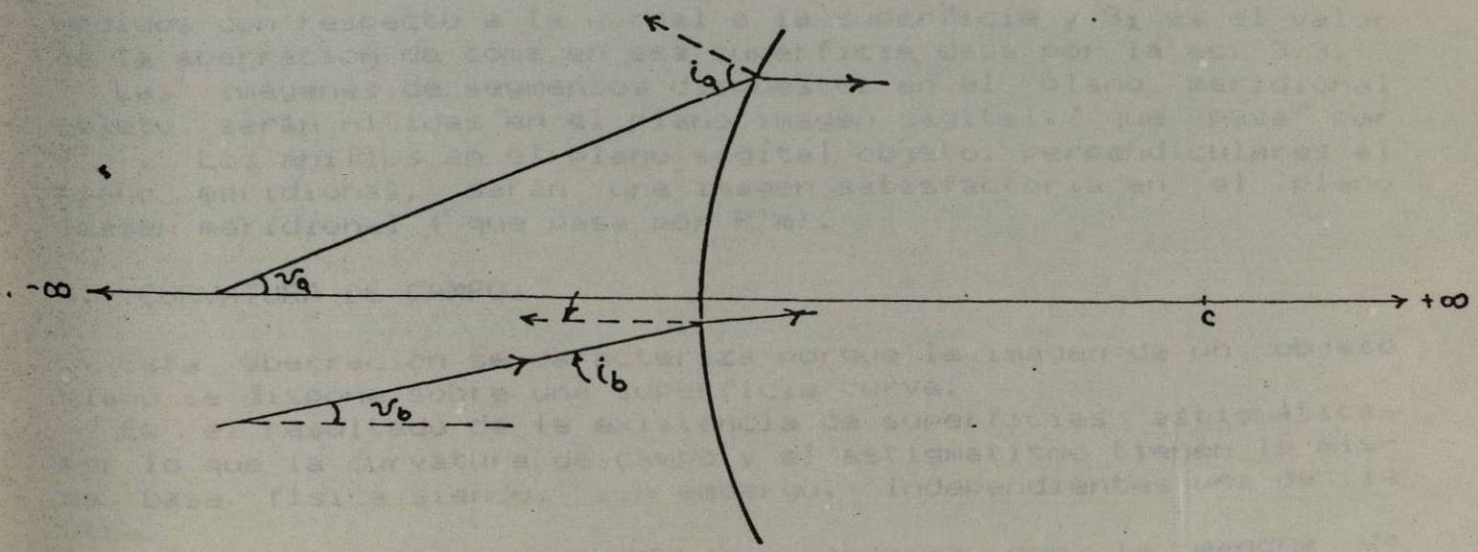


Fig. 3.3 Parámetros usados en las fórmulas para el cálculo de aberraciones.

pierde su caracter homocéntrico.

El astigmatismo consiste en que los rayos de un haz infinitamente estrecho que va cerca del rayo principal en los planos meridional y sagital, después de refractarse en el sistema óptico, no convergen hacia un solo punto, ya que los rayos que van por el plano meridional se reúnen en un punto y los que van por el sagital, en otro.

Supongamos que en el punto M de una superficie esférica incide el rayo principal de un haz de rayos infinitamente estrecho que proviene del punto objeto B (fig. 3.4). Al llegar a la superficie esférica, el haz forma una superficie elemental $msms$, distinguiéndose 2 direcciones perpendiculares entre si: la meridional mm y la sagital ss .

Como las curvaturas aparentes de las superficies refractoras a lo largo de los puntos de incidencia de estos haces son diferentes, también los rayos se refractarán en los planos meridional y sagital de modo distinto, teniéndose que los rayos meridionales se reunirán en el punto $P'm$ y los sagitales en $P's$ sobre el rayo principal. En el límite, las imágenes se representan como segmentos de recta (fig. 3.5), siendo que en realidad tienen forma de segmentos de óvalos. En el plano meridional, en particular en el punto $P'm$ la imagen tiene forma de un óvalo dispuesto horizontalmente mientras que en el plano sagital, en el punto $P's$, el óvalo esta orientado verticalmente. La distancia entre los puntos $P's$ y $P'm$ se llama diferencia astigmática la cual constituye la medida del astigmatismo.

La teoría de tercer orden da como resultado para la medida de la contribución de una superficie esférica al astigmatismo la siguiente ecuación:

$$\text{ASTIGMATISMO} = S_3 = q S_2 \quad (3.4)$$

donde $q = i_b / i_a$; tal que i_a e i_b son los ángulos paraxiales de incidencia de los rayos marginal y principal respectivamente, medidos con respecto a la normal a la superficie y S_2 es el valor de la aberración de coma en esa superficie dada por la ec. 3.3.

Las imágenes de segmentos dispuestos en el plano meridional objeto serán nítidas en el plano imagen sagital (que pasa por $P's$). Los anillos en el plano sagital objeto, perpendiculares al plano meridional, darán una imagen satisfactoria en el plano imagen meridional (que pasa por $P'm$).

4.- CURVATURA DE CAMPO.

Esta aberración se caracteriza porque la imagen de un objeto plano se dispone sobre una superficie curva.

Es el resultado de la existencia de superficies astigmáticas por lo que la curvatura de campo y el astigmatismo tienen la misma base física siendo, sin embargo, independientes una de la otra.

Al examinar el astigmatismo se observa que la mancha de difusión tendrá una forma aproximada al círculo entre los puntos $P'm$ y $P's$ (fig. 3.4), este círculo recibe el nombre de círculo de mínima confusión.

La posición media de la superficie focal imagen convencional

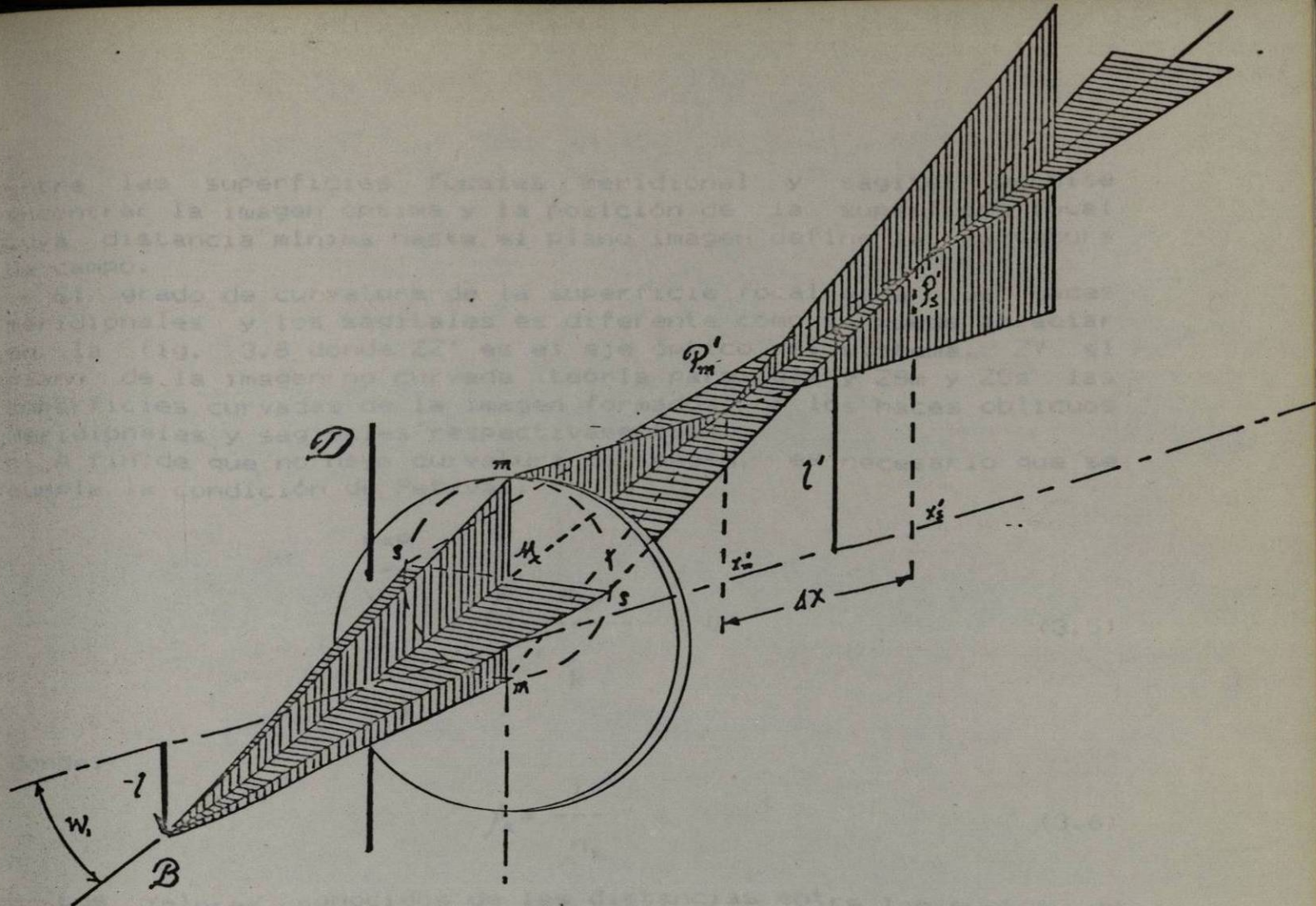


Fig. 3.4 Astigmatismo.

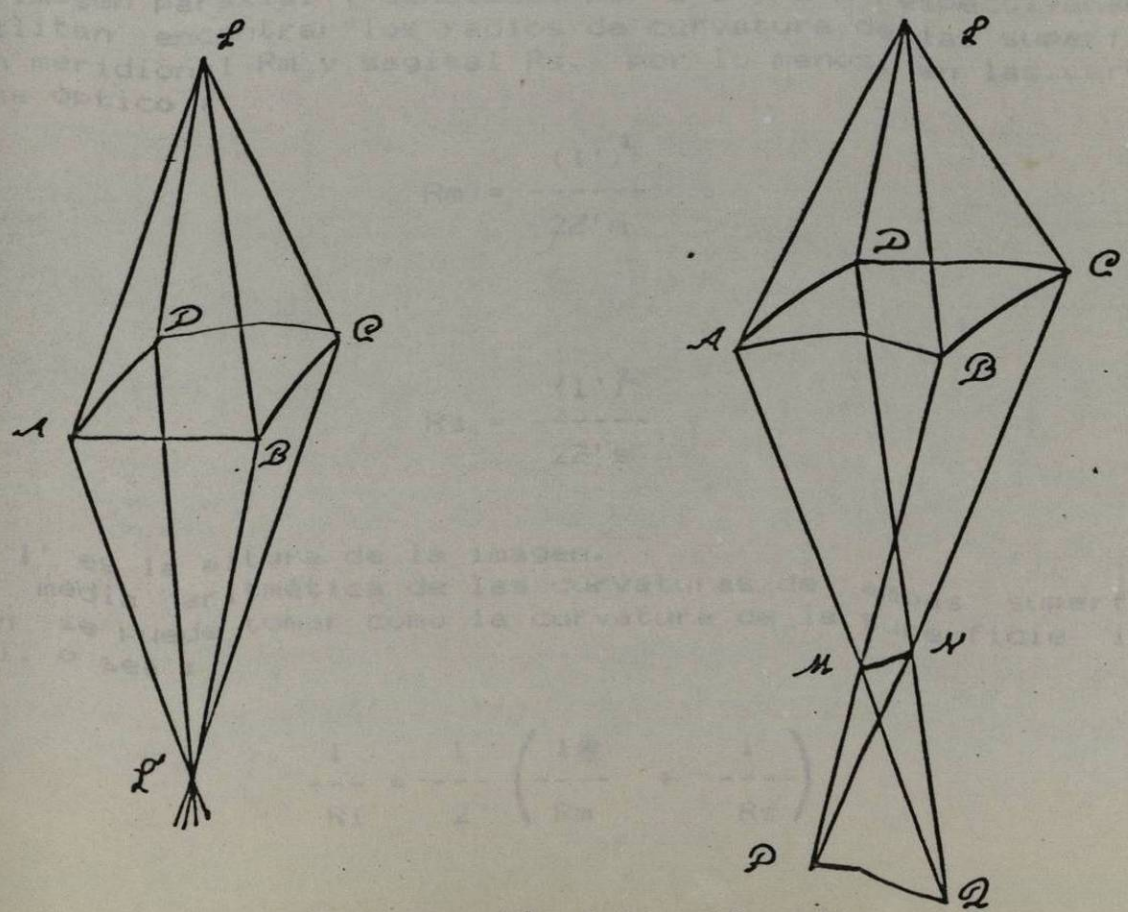


Fig. 3.5 Formación del astigmatismo.

entre las superficies focales meridional y sagital permite encontrar la imagen óptima y la posición de la superficie focal cuya distancia mínima hasta el plano imagen define la curvatura de campo.

El grado de curvatura de la superficie focal para los haces meridionales y los sagitales es diferente como se puede apreciar en la fig. 3.6 donde ZZ' es el eje óptico del sistema, ZY el plano de la imagen no curvada (teoría paraxial) y ZSm y ZSs las superficies curvadas de la imagen formados por los haces oblicuos meridionales y sagitales respectivamente.

A fin de que no haya curvatura de imagen, es necesario que se cumpla la condición de Petzval:

$$\sum_{k=1}^{k=P} \frac{f_{kH} - f_k}{r_k} = 0 \quad (3.5)$$

donde:

$$f_k = \frac{1}{n_k} \quad (3.6)$$

Los valores conocidos de las distancias entre los puntos de convergencia P's y P'm (fig. 3.6) sobre el rayo principal y el plano imagen paraxial (denotadas por Z's y Z'm respectivamente) posibilitan encontrar los radios de curvatura de las superficies imagen meridional Rm y sagital Rs, por lo menos, en las cercanías del eje óptico:

$$R_m = \frac{(l')^2}{2Z'm} \quad (3.7)$$

y:

$$R_s = \frac{(l')^2}{2Z's} \quad (3.8)$$

donde l' es la altura de la imagen.

La media aritmética de las curvaturas de ambas superficies imagen se puede tomar como la curvatura de la superficie imagen (1/Ri), o sea:

$$\frac{1}{R_i} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_m} + \frac{1}{R_s} \right) \quad (3.9)$$

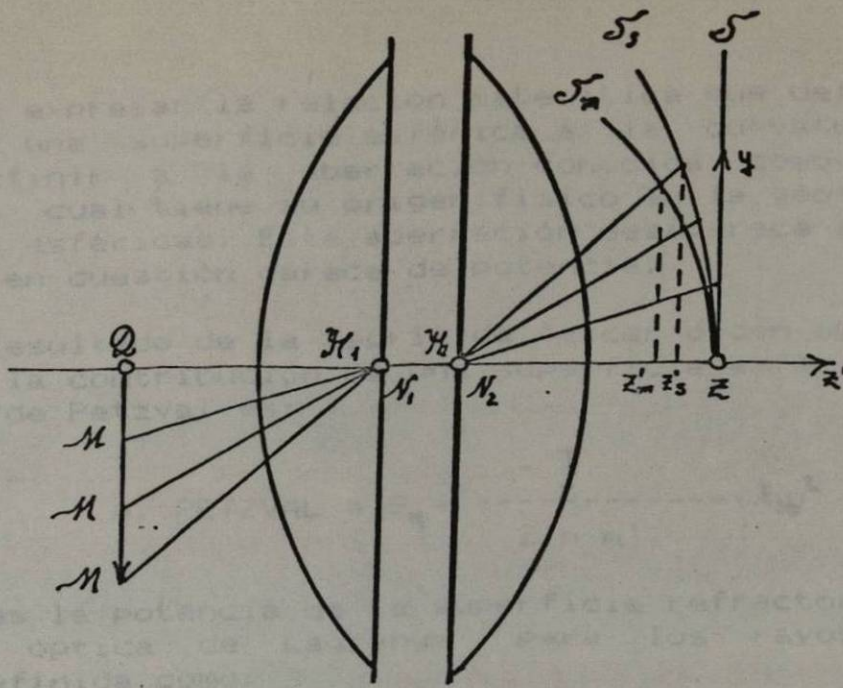


Fig. 3.6 Curvatura de los planos imagen sagital y meridional.

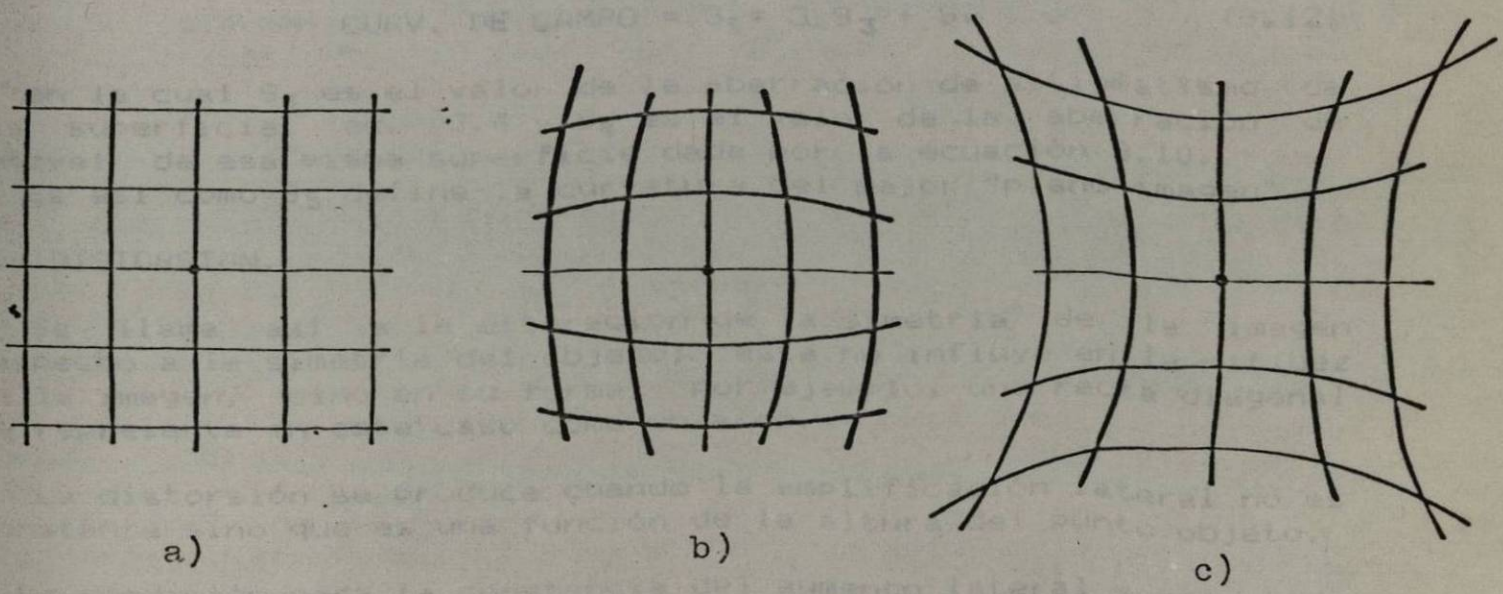


Fig. 3.7 Distorsión; en a) imagen no deformada, b) distorsión en barrilete y c) distorsión en almohadón.

Antes de expresar la relación matemática que define la contribución de una superficie esférica a la curvatura de campo, debemos definir a la aberración conocida como curvatura de Petzval la cual tiene su origen físico en la geometría de las superficies esféricas. Esta aberración desaparece solamente si la superficie en cuestión carece de potencia.

Como un resultado de la teoría de tercer orden obtenemos que la medida de la contribución de una superficie esférica a la aberración de Petzval es:

$$A. \text{ PETZVAL} = S_4 = \frac{-\bar{\Phi}}{2 n n'} (\lambda_{ab})^2 \quad (3.10)$$

donde $\bar{\Phi}$ es la potencia de la superficie refractora y λ_{ab} es la invariante óptica de Lagrange para los rayos principal y marginal definida como:

$$\lambda_{ab} = y_a n' v_b - y_b n v_a \quad (3.11)$$

y en la cual y_a e y_b se refieren a las alturas de los rayos marginal y principal respectivamente y v_a y v_b a los ángulos paraxiales de los mismos rayos marginal y principal.

La curvatura de campo será entonces una función de los valores de las aberraciones de astigmatismo y curvatura de Petzval.

La contribución de una superficie esférica a la curvatura de campo vendrá dada por:

$$\text{CURV. DE CAMPO} = S_5 = 3 S_3 + S_4 \quad (3.12)$$

y en la cual S_3 es el valor de la aberración de astigmatismo de esa superficie, ec. 3.4 y S_4 es el valor de la aberración de Petzval de esa misma superficie dada por la ecuación 3.10.

Es así como S_5 define la curvatura del mejor "plano imagen".

5.- DISTORSION.

Se llama así a la alteración de la simetría de la imagen respecto a la simetría del objeto; esta no influye en la nitidez de la imagen, sino en su forma; por ejemplo, una recta diagonal se representa en este caso como un arco.

La distorsión se produce cuando la amplificación lateral no es constante sino que es una función de la altura del punto objeto.

La condición para la constancia del aumento lateral sobre todo el campo imagen se llama condición de ortoscopia o de las tangentes. De la fig. 3.8 y la ec. 1.5 se obtiene que:

$$\beta = \frac{\text{tg } w'_1}{\text{tg } w_1} = \frac{\text{tg } w'_2}{\text{tg } w_2} = \dots = \text{cte.} \quad (3.13)$$

La distorsión se denomina en almohadón o positiva cuando la imagen de un cuadrado regular se presenta como un almohadón (o corsé) en la cual la altura de puntos de la imagen sobre el eje óptico es mayor que el teórico; en caso contrario se llama en barrilete o negativa (fig.3.7).

La distorsión absoluta (u óptica) se define por la igualdad :

$$\delta l' = l'_k - l'_0 \quad (3.14)$$

donde l'_0 es la altura teórica de la imagen calculada por el rayo principal y l'_k es la altura real de la imagen.

El cálculo de la contribución a la distorsión por una superficie esférica está dado por la fórmula:

$$\text{DISTORSION} = S_6 = q (q^2 S_1 + S_4) \quad (3.15)$$

donde $q = i_b / i_a$; tal que i_a e i_b son los ángulos paraxiales de incidencia de los rayos marginal y principal respectivamente, medidos con respecto a la normal a la superficie, S_1 es el valor de la aberración esférica para esa superficie (ec. 3.2) y S_4 es el valor de la aberración de Petzval (ec. 3.10).

B.- ABERRACIONES CROMÁTICAS.

Para el estudio y definición de las aberraciones geométricas o de Seidel, se consideró que el haz de luz era monocromático y, por lo tanto, el índice de refracción de cada medio era una constante, para tales cálculos se emplea por convención el índice de refracción n (589.3nm, doblete del sodio). Sin embargo, un sistema óptico, por lo general, es usado para haces de luz policromáticos produciéndose también, entonces, lo que se conoce como aberraciones cromáticas, los cuales provienen del hecho de que, para el haz multicolor, una lente posee dispersión y no produce una sola imagen del objeto, sino que crea, en diferentes planos, imágenes para cada color. Al colocar una pantalla, éstas se perciben como círculos o manchas difusas lo que produce la falta de nitidez de la imagen.

Los valores de estas aberraciones cromáticas se calculan para determinadas longitudes de onda en una zona del espectro óptico. Para el ojo humano, esta se limita a las longitudes de onda de aproximadamente 486nm (F: línea azul del hidrógeno) y 656nm (C: línea roja del hidrógeno) en la zona visible del espectro.

Es conocido el hecho de que la luz blanca, al sufrir una refracción, produce una descomposición del haz inicial en sus colores componentes, hecho estudiado por primera vez por I. Newton.

De la fig. 3.8 la diferencia angular de los rayos F y C es una medida de la dispersión producida.

La dispersión está definida como la diferencia:

$$n_F - n_C \quad (3.16)$$

donde n_F es el índice de refracción para la línea azul del Hidrógeno ($\lambda_F = 486.1 \text{ nm}$) y n_C se refiere al índice de refracción para la línea roja del Hidrógeno ($\lambda_C = 656.3 \text{ nm}$) del material.

El medio refringente suele caracterizarse por la magnitud conocida como dispersión relativa la cual viene dada por :

$$\frac{n_F - n_C}{n_D - 1} \quad (3.17)$$

donde n_D se refiere al índice de refracción para la longitud de onda amarilla ($\lambda_D = 589.3 \text{ nm}$) del sodio.

En los catálogos comerciales, los medios ópticos o los vidrios ópticos vienen caracterizados, por la magnitud inversa de la dispersión relativa:

$$V = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C} \quad (3.18)$$

la cual es llamada coeficiente de dispersión o número de Abbe. Para un medio poco dispersivo V es grande mientras que para uno muy dispersivo V es pequeño.

Dado que las aberraciones cromática axial o longitudinal y la llamada cromática lateral son de una magnitud comparable a las aberraciones de Seidel, su corrección es de considerable importancia siendo estas dos, las que definiremos a continuación.

1.- ABERRACION CROMATICA AXIAL.

De la óptica geométrica se deduce que la distancia focal de las lentes (f) se define por la relación:

$$\frac{1}{f} = (N - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (3.19)$$

donde N es el índice relativo de refracción para la línea D (ec. 1.3).

De la ec. 3.19 podemos apreciar que una vez fijos R_1 y R_2 , f dependerá de N el cual depende, a su vez, de cada longitud de onda o color de haz.

Así, incluso para rayos paraxiales, el haz no monocromático tendrá diferentes focos a lo largo del eje óptico (fig. 3.9).

Debido a esto, un punto en el eje tendrá como imagen círculos coloreados cuyas dimensiones relativas dependen de la posición de la pantalla en donde se observe su imagen.

Cuanto menor sea la dispersión de la lente, menor será la aberración cromática axial, la cual se define como la magnitud de la distancia entre el foco paraxial para el color violeta (F) y el foco paraxial para el color rojo (C) del sistema que se este

evaluando.

La medida de la contribución de una superficie esférica a esta aberración esta dada por:

$$A. \text{ CROM. AXIAL} = S_7 = n y_a i_a \left(\frac{\Delta n}{n} - \frac{\Delta n'}{n'} \right) \quad (3.20)$$

donde y_a es la altura del rayo marginal en esa superficie, i_a es el ángulo paraxial de incidencia del rayo marginal sobre la superficie con respecto a la normal a la superficie y las dispersiones relativas del espacio objeto y del espacio imagen respectivamente vienen dados por:

$$\frac{\Delta n}{n} = \frac{n-1}{nV} \quad \text{y} \quad \frac{\Delta n'}{n'} = \frac{n'-1}{n'V'} \quad (3.21-a,b)$$

2.-ABERRACION CROMATICA LATERAL.

En las lentes singletes delgadas (grosor \ll diámetro) la coincidencia de la posición de los focos para diferentes longitudes de onda trae consigo la igualación de las distancias focales, lo cual constituye una acromatización completa.

En cambio, cuando se trata de lentes gruesas o sistemas de lentes, la coincidencia de los puntos focales no significa una coincidencia de las distancias focales efectivas, pues estas se miden a partir de los puntos principales los cuales pueden tener diferentes posiciones para cada color.

Esta diferencia de distancias focales trae consigo una diferencia en el aumento o amplificación para cada longitud de onda, razón por lo cual los objetos de dimensiones finitas dan imágenes con una orla de colores. Este error cromático lleva el nombre de aberración cromática lateral o diferencia cromática de los aumentos (fig. 2.12).

La medida de la contribución de una superficie esférica a esta aberración se obtiene mediante la fórmula:

$$A. \text{ CROM. LATERAL} = S_8 = q S_7 \quad (3.22)$$

donde $q = i_b / i_a$; tal que i_a e i_b son los ángulos de incidencia de los rayos marginal y principal respectivamente, sobre la superficie, medidos con respecto a la normal a la superficie y S_7 es el valor de la aberración cromática axial para esa superficie.

Como última observación es conveniente señalar que para calcular alguna de las aberraciones de un sistema óptico es necesario sumar la contribución que cada superficie proporciona a la aberración total (principio de superposición) y la aberración efectiva se obtiene multiplicando el valor total de las contribuciones (para cada aberración) por el número efe (f#) del sistema.

De esta manera tenemos que para un sistema óptico compuesto por k superficies los valores de las aberraciones serán:

$$S_m = f \# \sum S_{mi} \quad \text{para } i=1,2,3,\dots,k \quad (3.23)$$

y $m=1,2,3,\dots,8$

donde el subíndice m se refiere a un tipo de aberración y S_{mi} a la contribución de la i -ésima superficie del sistema óptico al valor de la aberración S_m .

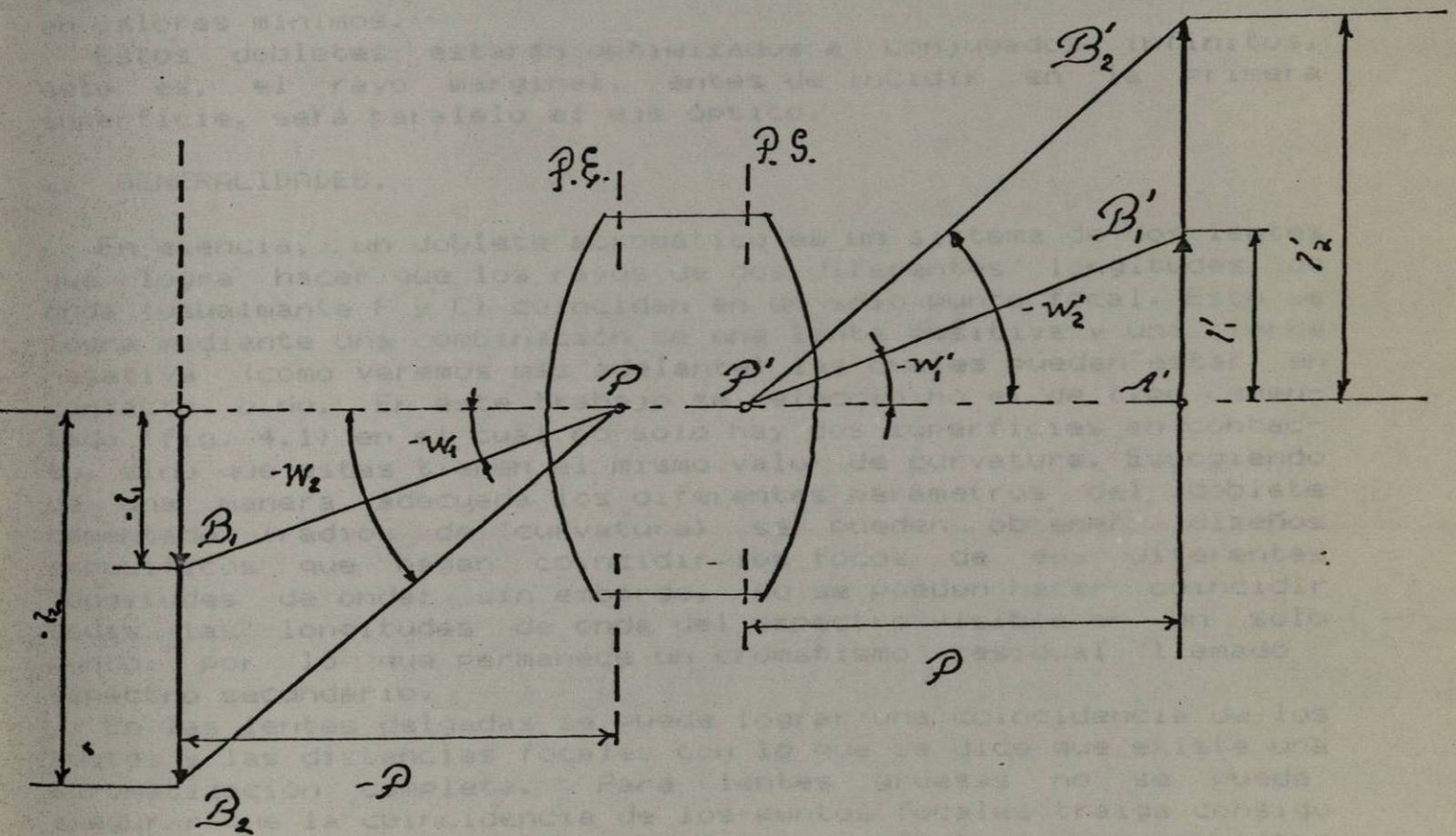


Fig. 3.8 Condición de las tangentes.

CAPITULO IV

DOBLETES ACROMATICOS

1.- INTRODUCCION.

El hecho de que se dedique todo este capítulo a los dobletes acromáticos cementados es debido a que estos componentes ópticos son de una calidad intermedia (valores de las aberraciones en el rango de $10E-02$) por lo que los diseñadores recurren a ellos cuando la tolerancia en la calidad de la imagen lo permite, lo que ocurre frecuentemente. Una parte del programa desarrollado permite encontrar los parámetros de diseño necesarios para elaborar un doblete acromático con algunas características requeridas, tratando de que el doblete no solo sea acromático, sino que los valores de las aberraciones de esfericidad y coma se encuentren en valores mínimos.

Estos dobletes estarán optimizados a conjugados infinitos, esto es, el rayo marginal, antes de incidir en la primera superficie, será paralelo al eje óptico.

2.- GENERALIDADES.

En esencia, un doblete acromático es un sistema de dos lentes que logra hacer que los rayos de dos diferentes longitudes de onda (usualmente F y C) coincidan en un solo punto focal. Esto se logra mediante una combinación de una lente positiva y una lente negativa (como veremos más adelante) las cuales pueden estar en contacto o no. En este trabajo se seleccionó el de tipo cementado (fig. 4.1) en el cual no solo hay dos superficies en contacto, sino que estas tienen el mismo valor de curvatura. Escogiendo de una manera adecuada los diferentes parámetros del doblete cementado (radios de curvatura) se pueden obtener diseños específicos que hagan coincidir los focos de dos diferentes longitudes de onda; sin embargo, no se pueden hacer coincidir todas las longitudes de onda del espectro visible en un solo punto, por lo que permanece un cromatismo residual llamado espectro secundario.

En las lentes delgadas se puede lograr una coincidencia de los puntos y las distancias focales con lo que se dice que existe una acromatización completa. Para lentes gruesas no se puede asegurar que la coincidencia de los puntos focales traiga consigo la igualdad de las distancias focales efectivas, pues estas últimas se miden a partir de los planos principales cuya localización puede ser diferente para diversas longitudes de onda.

3.- CONDICIONES DE ACROMATICIDAD

Consideremos de una manera general un sistema de dos lentes delgadas separadas una distancia t y donde el medio que las rodea es aire (fig. 4.2).

Cada lente posee una potencia dada por la ecuación 1.10; designándolas por I_a y I_b respectivamente, según se aprecia en la figura 4.2, teniendo entonces que:

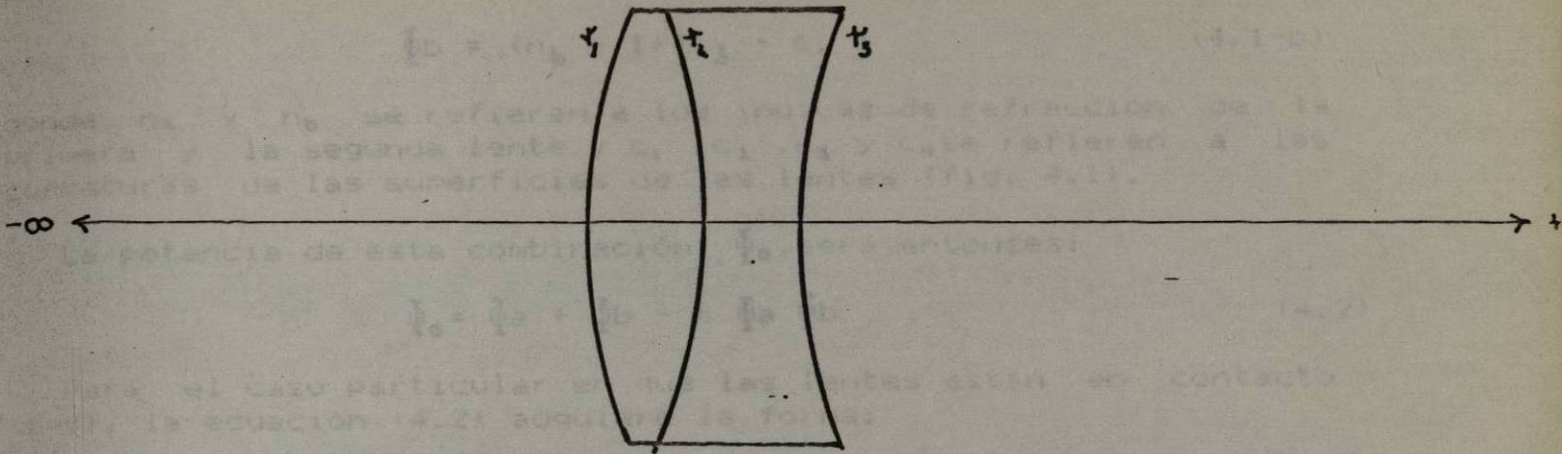


Fig. 4.1 Doblete cementado.

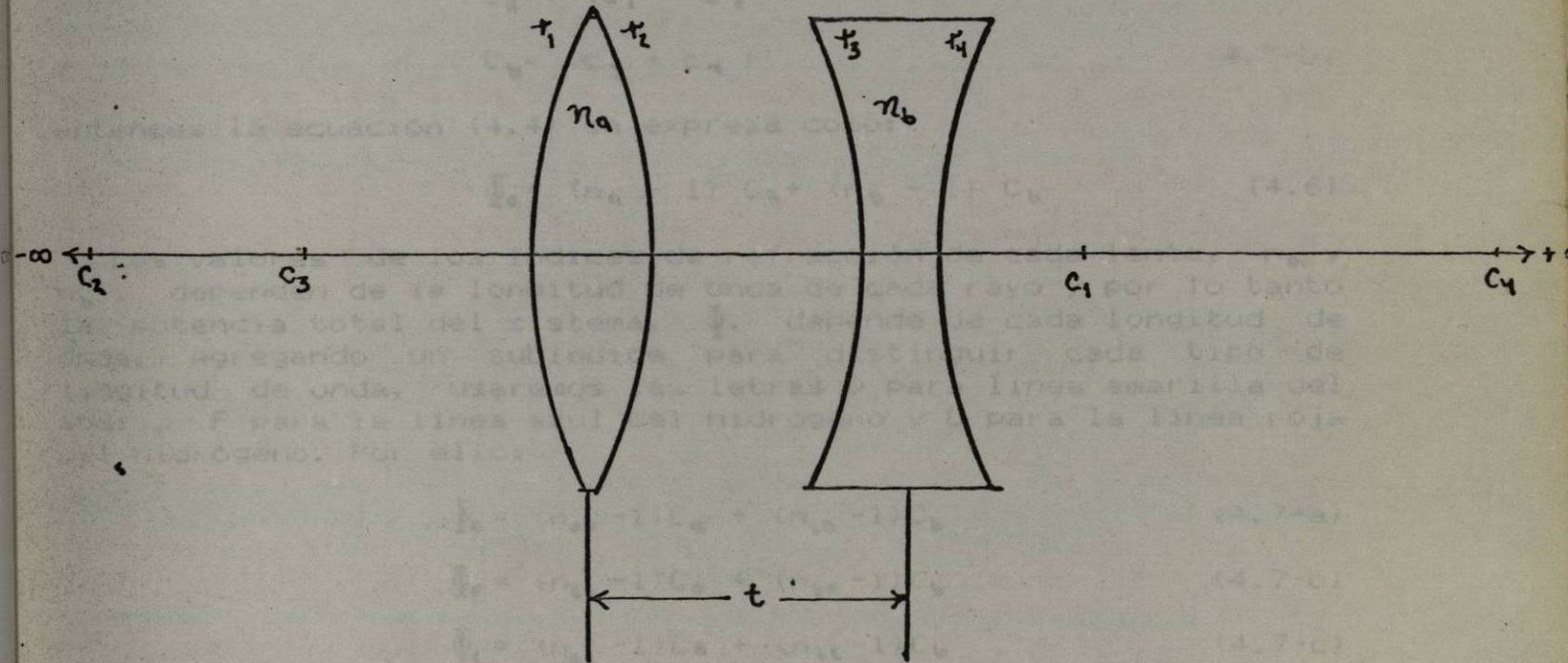


Fig. 4.2 Doblete separado de componentes
delgadas inmerso en aire.

$$\bar{\Phi}_a = (n_a - 1)(c_1 - c_2) \quad (4.1-a)$$

$$\bar{\Phi}_b = (n_b - 1)(c_3 - c_4) \quad (4.1-b)$$

donde n_a y n_b se refieren a los índices de refracción de la primera y la segunda lente y c_1, c_2, c_3 y c_4 se refieren a las curvaturas de las superficies de las lentes (fig. 4.1).

La potencia de esta combinación, $\bar{\Phi}_0$, será entonces:

$$\bar{\Phi}_0 = \bar{\Phi}_a + \bar{\Phi}_b - t \bar{\Phi}_a \bar{\Phi}_b \quad (4.2)$$

Para el caso particular en que las lentes están en contacto ($t=0$), la ecuación (4.2) adquiere la forma:

$$\bar{\Phi}_0 = \bar{\Phi}_a + \bar{\Phi}_b \quad (4.3)$$

Sustituyendo las expresiones para $\bar{\Phi}_a$ y $\bar{\Phi}_b$ en esta última ecuación:

$$\bar{\Phi}_0 = (n_a - 1)(c_1 - c_2) + (n_b - 1)(c_3 - c_4) \quad (4.4)$$

Si ahora definimos a:

$$C_a = (c_1 - c_2) \quad (4.5-a)$$

$$C_b = (c_3 - c_4) \quad (4.5-b)$$

entonces la ecuación (4.4) se expresa como:

$$\bar{\Phi}_0 = (n_a - 1) C_a + (n_b - 1) C_b \quad (4.6)$$

Los valores de los índices de refracción de cada lente, n_a y n_b , dependen de la longitud de onda de cada rayo y por lo tanto la potencia total del sistema, $\bar{\Phi}$, depende de cada longitud de onda. Agregando un subíndice para distinguir cada tipo de longitud de onda, usaremos las letras D para línea amarilla del sodio, F para la línea azul del hidrógeno y C para la línea roja del hidrógeno. Por ello:

$$\bar{\Phi}_0 = (n_{aD} - 1) C_a + (n_{bD} - 1) C_b \quad (4.7-a)$$

$$\bar{\Phi}_F = (n_{aF} - 1) C_a + (n_{bF} - 1) C_b \quad (4.7-b)$$

$$\bar{\Phi}_C = (n_{aC} - 1) C_a + (n_{bC} - 1) C_b \quad (4.7-c)$$

Para lograr la acromatización del doblete, haremos coincidir las distancias focales para la línea azul y roja del hidrógeno, por ser estos los extremos del espectro visible:

$$\bar{\Phi}_F = \bar{\Phi}_C \quad (4.8)$$

Sustituyendo a 4.7-b y 4.7-c en 4.8:

$$\frac{C_a}{C_b} = \frac{n_{bc} - n_{bf}}{n_{af} - n_{ac}} \quad (4.9)$$

Usando 4.5 a y b en 4.1 a y b y tomando en cuenta las consideraciones anteriores:

$$\frac{C_a}{C_b} = \frac{\bar{\Phi}_{aD}(n_{bD} - 1)}{\bar{\Phi}_{bD}(n_{aD} - 1)} \quad (4.10)$$

Iguando 4.9 y 4.10 obtenemos que:

$$\frac{\bar{\Phi}_{aD}}{\bar{\Phi}_{bD}} = \frac{(n_{bD} - 1)/(n_{bf} - n_{bc})}{(n_{aD} - 1)/(n_{af} - n_{ac})} \quad (4.11)$$

Recordando la definición del número de Abbe, dado por la ecuación 3.18, tenemos que 4.11 se expresa, en términos de los números de Abbe de la lente A y la lente B, como:

$$\frac{\bar{\Phi}_{aD}}{\bar{\Phi}_{bD}} = - \frac{V_a}{V_b} \quad (4.12)$$

Dado que los números de Abbe son todos positivos, el signo negativo en la ecuación 4.12 indica que, mientras una de las lentes tenga una potencia negativa, la otra debe tener una potencia positiva.

Sustituyendo $\bar{\Phi}_{aD}$ ó $\bar{\Phi}_{bD}$ de 4.3 y usando 4.12 se obtiene:

$$\bar{\Phi}_{aD} = \frac{\bar{\Phi}_0}{1 - V_b/V_a} \quad (4.13-a)$$

$$\bar{\Phi}_{bD} = \frac{\bar{\Phi}_0}{1 - V_a/V_b} \quad (4.13-b)$$

Con lo descrito hasta ahora somos capaces de diseñar un doblete acromático con dos vértices en contacto siempre y cuando conozcamos la potencia total del sistema, $\bar{\Phi}$, y los números de Abbe, V_a y V_b , de las lentes usando las ecuaciones 4.13-a,b.

Ahora, dado que deseamos diseñar un doblete acromático cementado, se debe cumplir:

$$C_2 = C_3 \quad (4.14)$$

Despejando de las ecuaciones 4.1 a-b a C_2 y C_3 para sustituirlos en la ecuación 4.14 obtenemos que, tomando como referencia la línea D del espectro:

$$C_1 \frac{\bar{\Phi}_{aD}}{n_{aD} - 1} = \frac{\bar{\Phi}_{bD}}{n_{bD} - 1} + C_4 \quad (4.15)$$

De la ecuación 4.13 podemos obtener a c_4 como:

$$c_4 = c_1 - \frac{\bar{I}_{a0}}{n_{a0} - 1} - \frac{\bar{I}_{b0}}{n_{b0} - 1} \quad (4.16)$$

Usando a 4.1-a encontramos a c_2 y con ello a c_3 :

$$c_2 = c_1 - \frac{\bar{I}_{a0}}{n_{a0} - 1} \quad (4.17)$$

Observese que, dada la condición de cementado (ec. 4.14) nuestro sistema consta en realidad de 3 superficies por lo que es prudente redefinir 4.16 de acuerdo a la figura 4.3 :

$$c_3 = c_1 - \frac{\bar{I}_{a0}}{n_{a0} - 1} - \frac{\bar{I}_{b0}}{n_{b0} - 1} \quad (4.18)$$

Con las ecuaciones 4.17 y 4.18 podemos obtener c_2 y c_3 en función de c_1 .

A continuación determinaremos las condiciones que debe cumplir nuestro diseño para que, además de ser acromático, se encuentre en la vecindad de mínimos valores de aberraciones esférica y coma.

3.- CONDICIONES PARA MINIMAS ABERRACIONES ESFERICA COMA.

En el capítulo anterior se trataron las 5 aberraciones geométricas, ó de Seidel, y dos aberraciones cromáticas; se dieron expresiones matemáticas para calcular la contribución de cada una de las superficies de un sistema al total de las aberraciones. Sin embargo, estas expresiones no son las convenientes para encontrar las condiciones que debe cumplir el doblete acromático cementado para que posea mínimos valores de aberraciones de esférica y coma.

Para obtener estas condiciones usaremos las ecuaciones para el cálculo de aberraciones por sumas G , las cuales son una aproximación simplificada de las ecuaciones de tercer orden para las aberraciones de una lente, tanto geométricas como cromáticas empleando un solo rayo, el rayo marginal paraxial.

A continuación se expresan las relaciones matemáticas que definen la contribución de una superficie refractora a cada una de las aberraciones geométricas y a la aberración cromática longitudinal por sumas G para una lente:

$$S_1 = \text{ESFERICA} = - \frac{y_{a1}^4}{(v'_{ax})^2} \left[G_1 c^3 - G_2 c^2 c_1 + G_3 c^2 \frac{v_{a1}}{y_{a1}} - G_4 c c_1^2 - G_5 c c_1 \frac{v_{a1}}{y_{a1}} + G_6 c^2 \left(\frac{v_{a1}}{y_{a1}} \right)^2 \right] \quad (4.19-a)$$

$$S_2 = \text{COMA} = -h y_{a1}^2 \left[G_5 \frac{c c_1}{4} - G_7 c \frac{v_{a1}}{y_{a1}} - G_8 c^2 \right] \quad (4.19-b)$$

$$S_3 = \text{ASTIGMATISMO} = -h^2 \bar{\Phi} / 2 \quad (4.19-c)$$

$$S_4 = \text{PETZVAL} = -h^2 \bar{\Phi} / 2n \quad (4.19-d)$$

$$S_5 = \text{CROM. LONG.} = -y_{a1}^2 \bar{\Phi} / (v'_{ax} V) \quad (4.19-e)$$

donde las constantes G están dadas por:

$$G_1 = N^2 (N - 1) / 2$$

$$G_5 = 2(N^2 - 1) / N$$

$$G_2 = (2N + 1)(N - 1) / 2$$

$$G_6 = (3N + 2)(N - 1) / 2N$$

$$G_3 = (3N + 1)(N - 1) / 2$$

$$G_7 = (2N + 1)(N - 1) / 2N$$

$$G_4 = (N + 2)(N - 1) / 2N$$

$$G_8 = N(N - 1) / 2$$

y en las ecuaciones 4.19 se tiene a:

h = altura real de la imagen = $f v'_{ax}$;

v_{a1} = ángulo de entrada del rayo marginal con respecto al eje óptico;

v'_{ax} = ángulo de salida del rayo marginal con respecto al eje óptico después de la última superficie del sistema;

y_{a1} = altura del rayo marginal en la primera superficie del sistema óptico;

$c = (c_1 - c_2)$ curvatura de la lente;

$\bar{\Phi}$ = potencia de la lente;

$N = n_D$: índice de refracción de la lente para la longitud de onda amarilla del sodio;

V = número de Abbe.

3.1.- CONDICION DE MINIMA ESFERICA.

A continuación tomaremos la ecuación 4.19-a de la aberración esférica, la cual está en función de y_a , v'_a , c y c_1 . De estos parámetros escogemos a c como la variable independiente. Del cálculo elemental, sabemos que para encontrar los puntos de inflexión de una función, los cuales pueden ser máximos o mínimos relativos, es necesario encontrar el punto donde la tangente a dicha función es cero.

Antes de derivar la ecuación 4.19-a respecto de c_1 e igualar a cero este resultado para encontrar un punto crítico (el cual nos interesa que sea un mínimo), debemos optimizar, por conveniencia,

la lente para conjugados infinitos; esta condición se logra cuando:

$$v_{a1} = 0 \quad (4.21)$$

El rayo marginal viene paralelo al eje óptico antes de incidir en la primera superficie. Al sustituir la ecuación 4.21 en la ecuación 4.19-a; esta queda como:

$$S_1 = - \frac{y_{a1}^4}{(v_{ax})^2} [G_1 c^3 - G_2 c^2 c_1 + G_4 c c_1^2] \quad (4.22)$$

Derivando 4.22 con respecto a c_1 e igualando a cero obtenemos la siguiente relación:

$$\frac{c_2}{c_1} = \frac{G_2 - 2G_4}{G_2} \quad (4.23)$$

Sustituyendo los valores de las constantes G_2 y G_4 , 4.23 nos queda como:

$$\frac{c_2}{c_1} = \frac{2n^2 - n - 4}{n(2n + 1)} \quad (4.24)$$

La ecuación 4.24 nos da la relación que debe existir entre las curvaturas de una lente para que la aberración esférica tome un valor crítico el cual puede ser un mínimo; para poder asegurar que es un mínimo el punto en cuestión es necesario que, según el criterio de la segunda derivada, se cumpla la siguiente condición:

$$\frac{\partial^2 S}{\partial c^2} > 0 \quad (4.25)$$

Aplicando 4.25 a la ecuación 4.22 obtenemos que para 4.24 se tiene un valor mínimo relativo siempre y cuando:

$$c_1 > c_2 \quad (4.26)$$

3.2.- CONDICION DE MINIMA COMA.

Ahora, tomando la ecuación 4.19-b y escogiendo nuevamente a c como variable independiente pues interesa que los resultados estén en función de esta variable y estar en concordancia con los resultados del punto 3.1. Aplicando a 4.19-b la condición dada por la ecuación 4.21 (conjugados infinitos) se obtiene:

$$S_2 = - h y_{a1}^2 [G_5 \frac{c c_1}{4} - G_8 c^2] \quad (4.27)$$

ya que la ecuación 4.27 es una ecuación de primer grado para c_1 , no es necesario derivar para encontrar un mínimo; basta con igualar la ecuación 4.27 a cero y resolver para c_1 :

$$G_5 \frac{cc_1}{4} - G_8 c^2 = 0 \quad (4.28)$$

Despejando c_1 y substituyendo los valores de G_5 , G_8 y c , se tiene que:

$$\frac{c_2}{c_1} = \frac{n^2 - n - 1}{n^2} \quad (4.29)$$

La ecuación 4.29 nos da la relación que debe existir entre c_1 y c_2 para que la lente posea cero aberración de coma.

4.- CONSIDERACIONES PARA LA OBTENCION DE DOBLETES ACROMATICOS CEMENTADOS CUYOS VALORES DE ABERRACIONES ESFERICA Y COMA SON MINIMOS.

Se ha estado hablando de las aberraciones por sumas G para una lente no obstante que se necesita aplicarlas para un doblete el cual consta de 2 lentes. Lo que se hará es considerar, como primer paso, al doblete como una sola lente.

Para lograr una buena descripción de las aberraciones para el doblete acromático bajo la anterior consideración, se tomará un "Índice de refracción equivalente" el cual estará en función de los índices de refracción y potencias de las lentes que forman el doblete acromático:

$$N = \frac{\frac{n_a}{|\Phi_a|} + \frac{n_b}{|\Phi_b|}}{\frac{1}{|\Phi_a|} + \frac{1}{|\Phi_b|}} \quad (4.30)$$

Este valor será usado en las ecuaciones anteriores donde se requiera. De este modo, nuestro diseño cumplirá, aunque no exactamente, si de manera equilibrada las condiciones de mínimos valores de aberraciones esférica y coma.

Por las consideraciones que se han tomado es necesario variar el valor de c alrededor del valor que encontremos, pues c_1 es solo una aproximación y al variar c , en incrementos Δc , se obtienen diferentes diseños en vecindades de mínimos valores de aberraciones esférica y coma.

Por otra parte, las condiciones de acromaticidad dadas por las ecuaciones 4.13 a y b son válidas para un doblete de elementos delgados; al considerar un doblete cuyas componentes poseen grosor hay que introducir un factor multiplicativo, k , en la ecuación 4.12 el cual, al variar, permitirá encontrar la verdadera condición de acromaticidad. De esta forma, las ecuaciones 4.13 a-

b se transforman en:

$$\bar{\Psi}_a = \frac{\bar{\Psi}_b}{1 - kV_b / V_a} \quad (4.31-a)$$

$$\bar{\Psi}_b = - \frac{\bar{\Psi}_a}{V_a / kV_b - 1} \quad (4.31-b)$$

Como se puede ver, si $k=1$ las ecuaciones 4.31 a-b son iguales a las ecuaciones 4.13 a y b; por ello es conveniente variar a k en la vecindad $k=1$.

Al sustituir las ecuaciones 4.31 a y b en las ecuaciones 4.17 y 4.18 resulta:

$$c_2 = c_1 - \frac{\bar{\Psi}_b}{(n_{a0} - 1)(1 - kV_b / V_a)} \quad (4.32-a)$$

$$c_3 = c_1 - \frac{\bar{\Psi}_b}{(n_{a0} - 1)(1 - kV_b / V_a)} - \frac{\bar{\Psi}_b k V_b / V_a}{(n_{b0} - 1)(1 - kV_b / V_a)} \quad (4.32-b)$$

En las ecuaciones 4.24 y 4.29, c_2 se refiere a la segunda superficie de la lente considerada; en nuestro caso, el doblete será "esa lente" y por lo tanto c_2 se refiere a c_3 y n se refiere al índice de refracción equivalente N dado por la ecuación 4.30. Con esto se logra unificar los subíndices y se tiene que, de acuerdo a las ecuaciones 4.24 y 4.29 :

$$\frac{c_3}{c_1} = \frac{2N^2 - N - 4}{N(2n + 1)} \quad (4.33-a)$$

$$\frac{c_3}{c_1} = \frac{N^2 - N - 1}{N} \quad (4.33-b)$$

donde la ecuación 4.33-a se refiere a la condición para obtener un mínimo valor de aberración esférica y 4.33-b para obtener cero valor de aberración de coma.

Despejando a c_3 de la ecuación 4.33-a y sustituyendo este resultado en la ecuación 4.32-b obtenemos que:

$$c_{IE} = \frac{N(2N + 1)}{2N + 4} \left[\frac{\bar{\Psi}_b}{(n_{a0} - 1)(1 - kV_b / V_a)} - \frac{\bar{\Psi}_b k V_b / V_a}{(n_{b0} - 1)(1 - kV_b / V_a)} \right] \quad (4.34)$$

Esta ecuación logra unificar las condiciones de acromaticidad, cementado y mínima esférica; a continuación despejamos a c_3 de la ecuación 4.32-b para obtener una ecuación que unifica las condiciones de acromaticidad, cementado y cero coma:

$$c_{1c} = \frac{N^2}{N+1} \left[\frac{\bar{I}_0}{(n_{a0}-1)(1-kV_b/V_a)} - \frac{\bar{I}_0 k V_b/V_a}{(n_{b0}-1)(1-kV_b/V_a)} \right] \quad (4.35)$$

Dado que el índice de refracción equivalente N describe el comportamiento del doblete como una sola lente, en lo que respecta a las aberraciones esférica y coma podemos considerar que la solución de c se encuentra en la región descrita por las ecuaciones 4.34 y 4.35 tomando como mejor valor de c al promedio de ambos resultados:

$$c_1 = \frac{c_{1E} + c_{1c}}{2} \quad (4.36)$$

Haciendo operaciones en 4.36 con 4.34 y 4.35 obtenemos:

$$c_1 = \frac{1}{2} \left[\frac{N(2N+1)}{2N+4} + \frac{N^2}{N+1} \right] \left[\frac{\bar{I}_0}{(n_{a0}-1)(1-kV_b/V_a)} - \frac{\bar{I}_0 k V_b/V_a}{(n_{b0}-1)(1-kV_b/V_a)} \right] \quad (4.37)$$

Para calcular el grosor que debe tener cada una de las lentes del doblete de tal manera que el diseño sea físicamente realizable, debemos calcular la sagita de cada superficie la cual es la porción de recta comprendida entre el punto medio de un arco de círculo y el de su cuerda. La sagita se calcula con la siguiente fórmula:

$$s_i = \frac{1 - \sqrt{1 - (c_i y)^2}}{c_i} \quad (4.38)$$

donde las variables se pueden apreciar en la figura 4.3. Cuando la diferencia de la sagita de la primera superficie de cada componente sea positiva, la lente en cuestión será más ancha en los bordes por lo que el grosor mínimo que pueda tener la componente se le asigna sobre el eje óptico; si t es el grosor y z_{min} es el grosor mínimo:

$$t = z_{min} \quad (4.39)$$

en este caso.

Si ocurre lo contrario con las diferencias sagitales quiere decir que se trata de una lente positiva y, por lo tanto, el grosor de esta lente sobre el eje óptico será:

$$t = z_{min} - (s_{i1} - s_i) \quad (4.40)$$

y z_{min} será el grosor mínimo que pueda tener la lente en los bordes.

Es así como las ecuaciones 4.30, 4.32 a y b, 4.37, 4.38, 4.39, y 4.40 son la base para el diseño de dobletes acromáticos cementados en las vecindades de mínimos valores de aberraciones

esférica y coma optimizado para conjugados infinitos, mismas que son usadas en el programa de cómputo desarrollado.

Por último, dado que ahora podemos diseñar diferentes modelos de dobletes acromáticos cementados que reúnan ciertas características ($V_a, V_b, n_a, n_b, z_{miA}, \bar{f}_0$) podemos calcular las aberraciones de cada modelo diseñado y elegir así el que más se aproxime a nuestros requerimientos. También se encuentra una curva que describa cada una de las aberraciones de nuestros diseños en función de la curvatura c_1 y el factor de cromaticidad k de cada diseño que encontremos; al obtener una gráfica de cada curva, podemos apreciar mejor los resultados de variar los valores de las variables independientes, c_1 y k , en las aberraciones.

Al graficar las curvas de aberración, estas son descritas por ecuaciones de tercer grado de la siguiente manera:

$$\text{ABERRACION} = a + bx + cx^2 + dx^3 \quad (4.41)$$

donde a, b, c y d son constantes y x es una variable independiente, la cual puede ser la curvatura c_1 o el valor de k . Para obtener las constantes debemos obtener varios valores de una aberración en particular, tomando una de las variables de diseño (c_1 ó k) como el parámetro y la otra como la variable.

De esta manera podemos obtener un conjunto de 4 ecuaciones y 4 incógnitas donde estas son las constantes de la ecuación 4.41; tal sistema se resuelve por algún método conocido y así se obtienen las ecuaciones de aberración en función de las variables independientes de diseño.

Es importante notar que estas curvas de aberración describen los valores mínimos (ceros) de cada aberración en el plano (c_1, k).

En el programa de cómputo se utiliza el método de Montante para solucionar el sistema matricial referido anteriormente.

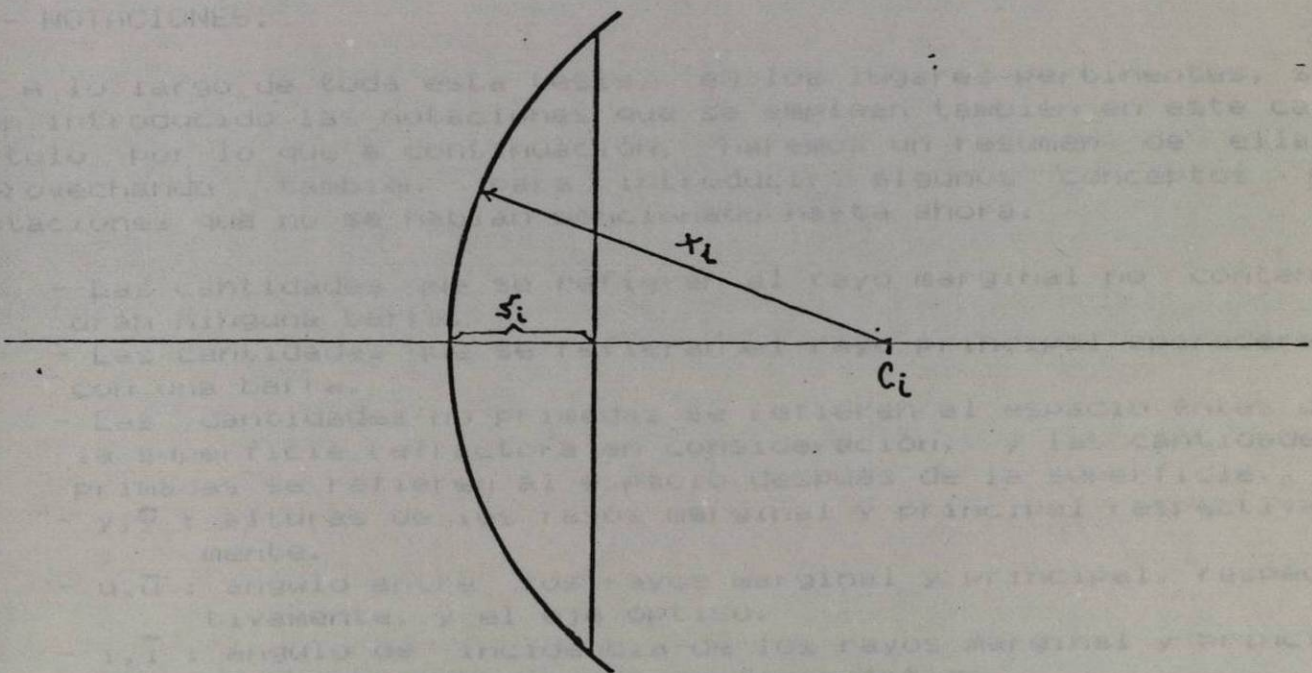


Fig. 4.3 Sagita de una superficie.

CAPITULO V

DIAGRAMAS $y-\bar{y}$ Y $n-\bar{n}$.

1.- INTRODUCCION.

El diagrama $y-\bar{y}$ proporciona un método de análisis de las propiedades, a primer orden, de un sistema óptico en el que solamente se necesitan conocer las alturas de los rayos marginal y principal al atravesar el sistema óptico, lo que permite conocer, a partir de estos datos, las distancias focales, pupilas de entrada y de salida, amplificación del sistema óptico, separación entre componentes y localización de los puntos principales.

El diagrama $y-\bar{y}$ es un diagrama bidimensional de estas propiedades y está basado en la constancia del invariante de Lagrange-Helmholtz para los rayos principal y marginal a través de un sistema óptico y en la ley de Snell.

Podemos decir que el diagrama $y-\bar{y}$ permite conocer en primera instancia las propiedades más importantes de un sistema óptico pudiendo apreciar como cambian estas propiedades al introducir alguna variación en los valores de los parámetros del sistema óptico como son curvaturas, índices de refracción o espesores.

Por otra parte está el diagrama $n-\bar{n}$ el cual es análogo al diagrama $y-\bar{y}$ teniendo, en algunos casos, algunas ventajas sobre este último.

En este capítulo se trata de exponer brevemente algunas de las propiedades más importantes de estos diagramas exponiendo solo algunos resultados los cuales se consideraran como básicos dentro del análisis de sistemas ópticos.

2.- NOTACIONES.

A lo largo de toda esta tesis, en los lugares pertinentes, se han introducido las notaciones que se emplean también en este capítulo por lo que a continuación, haremos un resumen de ellas aprovechando también para introducir algunos conceptos y notaciones que no se habían mencionado hasta ahora.

- Las cantidades que se refieran al rayo marginal no contendrán ninguna barra.
- Las cantidades que se refieran al rayo principal aparecerán con una barra.
- Las cantidades no primadas se refieren al espacio antes de la superficie refractora en consideración, y las cantidades primadas se refieren al espacio después de la superficie.
- y, \bar{y} : alturas de los rayos marginal y principal respectivamente.
- u, \bar{u} : ángulo entre los rayos marginal y principal, respectivamente, y el eje óptico.
- i, \bar{i} : ángulo de incidencia de los rayos marginal y principal sobre una superficie óptica.
- n, n' : índices de refracción antes y después de la superficie.
- t, t' : distancias axiales antes y después de las superfi-

cies.

- z : punto sobre el eje óptico.

(Note que $u_i^i = u_{i+1}$, $n_i^i = n_{i+1}$, $t_i^i = t_{i+1}$)

Ahora vamos a definir algunas cantidades que se conocen con el nombre de cantidades reducidas cuyo uso será muy común en este capítulo.

- i.- $\bar{t} = t_i/n_i$: es la separación axial reducida a lo largo del eje z entre las superficies i e i+1.
- ii.- $\bar{\omega} = n \bar{u}$: es el ángulo reducido del rayo principal.
- iii.- $\omega = n u$: es el ángulo reducido del rayo marginal.

El invariante de Lagrange está denotado por la letra rusa "dze", \mathcal{H} ; su importancia en los diagramas $y-\bar{y}$, $\Omega-\bar{\Omega}$, se debe a que estos dos diagramas se deducen, precisamente, de la constancia del invariante de Lagrange para los rayos marginal y principal trazados a través del sistema óptico. Por lo pronto podemos decir que el invariante de Lagrange se expresa, para los rayos marginal y principal, como:

$$\mathcal{H} = \bar{\omega}_y - \bar{y}_w$$

En cuanto a los subscripts se establece que:

La primera superficie física es denotada por el subscripto 1; la última superficie es denotada por el subscripto k; una superficie intermedia es etiquetada como la j-ésima o la i-ésima superficie.

El plano o superficie objeto es denotado por O y el plano o superficie imagen es denotado por O' o por I.

La superficie o plano de un diafragma físico es denotado por el subscripto S.

La superficie o plano de la pupila de entrada es denotada por un subscripto E mientras que la pupila de salida por una E'.

2.- EL DIAGRAMA $y-\bar{y}$.

Solamente dos rayos paraxiales, el marginal y el principal, se necesitan trazar a través de un sistema para determinar sus propiedades a primer orden. De las definiciones dadas en el capítulo I podemos deducir que el rayo marginal determina la posición de la imagen y el tamaño de la abertura, mientras que el rayo principal define el tamaño de la imagen y la posición del diafragma que determina la abertura del sistema.

2.1.- SISTEMA DE COORDENADAS.

Antes que todo estableceremos un sistema de coordenadas cartesiano donde el eje z será el eje óptico y el origen se podrá escoger en cualquier punto a lo largo del eje como se puede apreciar en la fig. 5.1.

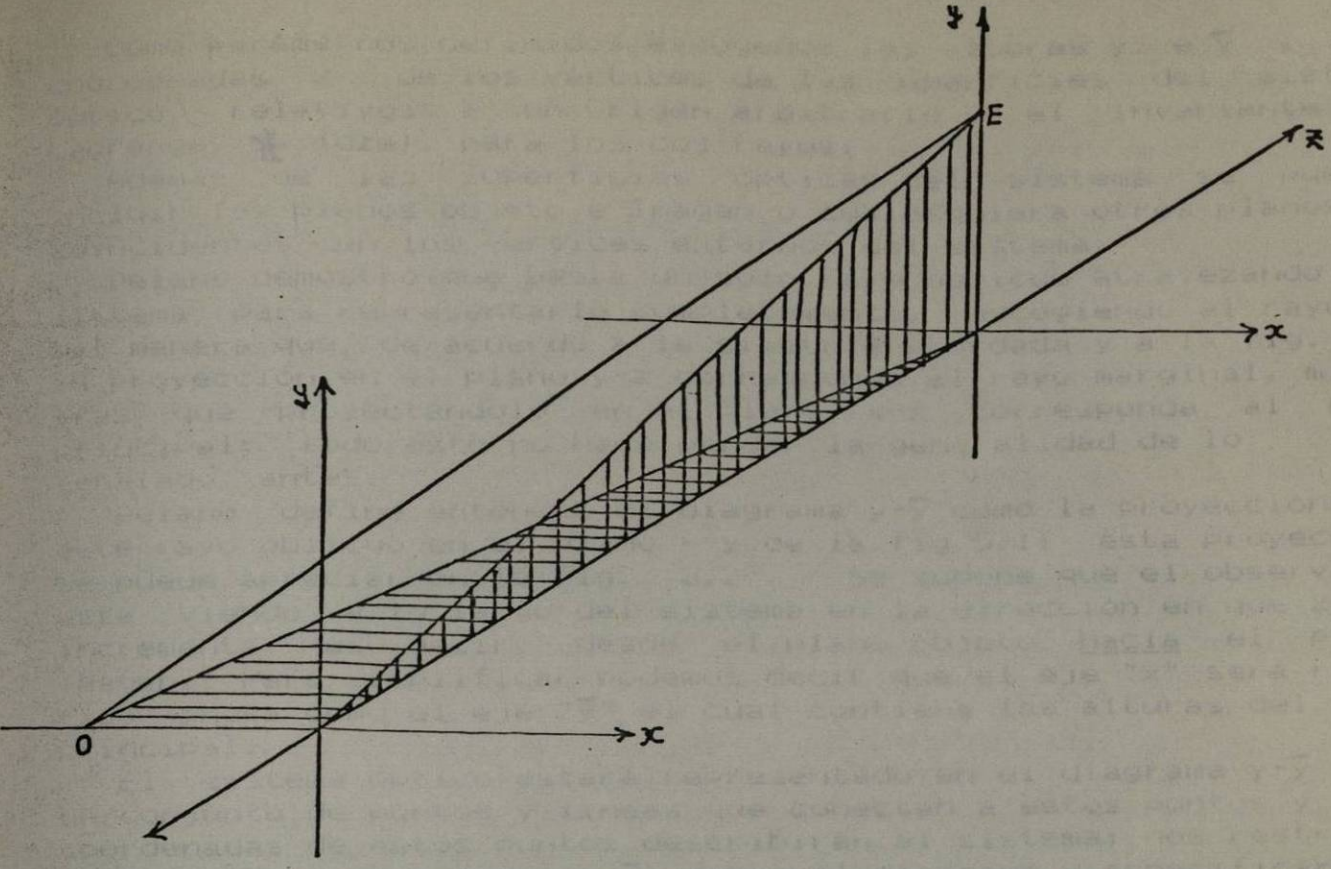


Fig. 5.1 Sistema de coordenadas mostrando los planos objeto y pupila de entrada así como los rayos principal y marginal que proyecta un rayo oblicuo.

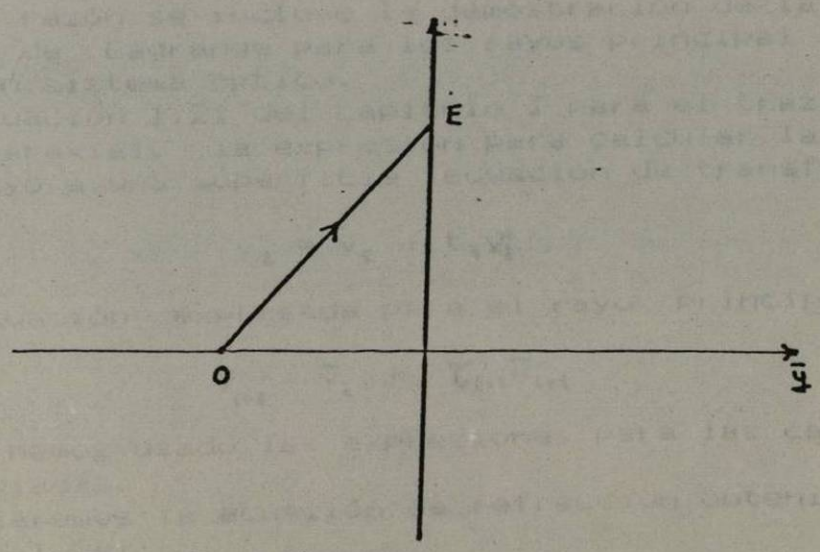


Fig. 5.2 Diagrama y - y para el rayo oblicuo de la fig. 5.1.

Como parámetros definidos escogemos las alturas y e \bar{y} , las coordenadas z de los vértices de las superficies del sistema óptico, relativos a un origen arbitrario y el invariante de Lagrange, \mathcal{H} (dze), para los dos rayos.

Además de las superficies ópticas del sistema se pueden incluir los planos objeto e imagen o cualesquiera otros planos no coincidentes con los vértices externos del sistema.

Delano demostró que basta un solo rayo oblicuo atravezando el sistema para representarlo completamente, escogiendo al rayo de tal manera que, de acuerdo a la simetría acordada y a la fig. 5.1 su proyección en el plano $y-z$ corresponda al rayo marginal, mientras que proyectándolo en el plano $x-z$ corresponda al rayo principal; todo esto no hace perder la generalidad de lo señalado antes.

Delano define entonces el diagrama $y-\bar{y}$ como la proyección de este rayo oblicuo en el plano $x-y$ de la fig. 5.1; esta proyección se puede apreciar en la fig. 5.2. Se supone que el observador está viendo a lo largo del sistema en la dirección en que z se incrementa, es decir, desde el plano objeto hacia el plano imagen. Para simplificar podemos decir que el eje "x" será referido ahora como el eje " \bar{y} " el cual contiene las alturas del rayo principal.

El sistema óptico estará representado en el diagrama $y-\bar{y}$ por un conjunto de puntos y líneas que conectan a estos puntos y las coordenadas de estos puntos describirán al sistema; nos restringiremos a las coordenadas $(y-\bar{y})$ sobre el diagrama y especificaremos separadamente los índices de refracción de los espacios homogéneos del sistema.

2.2.- DEDUCCION DEL INVARIANTE DE LAGRANGE

Como ya se mencionó, el invariante de Lagrange juega un papel muy importante en el diagrama $y-\bar{y}$ pues la deducción de este último se basa en la constancia del primero.

Por tal razón se incluye la demostración de la constancia del invariante de Lagrange para los rayos principal y marginal a través de un sistema óptico.

En la ecuación 1.21 del capítulo I para el trazado de rayos en la región paraxial, la expresión para calcular la altura con que llega un rayo a una superficie (ecuación de transferencia) es:

$$y_2 = y_1 + t_1 v_1' \quad (1.21)$$

Esta ecuación expresada para el rayo principal queda como:

$$\bar{y}_{in} = \bar{y}_i + t_{in} \bar{w}_{in} \quad (5.1)$$

en la cual hemos usado las expresiones para las cantidades reducidas apropiadas.

Ahora usaremos la ecuación de refracción obtenida en el capítulo I (ec. 1.20):

$$n_1' v_1' = n_1 v_1 - \mathcal{H}_1 v_1 \quad (1.20)$$

donde, como recordaremos, \mathcal{H}_1 está definido por la ecuación 1.19.

Nuevamente, para el rayo principal usaremos la notación que ya se ha mencionado con lo que la expresión para la ecuación de refracción se transforma, para el rayo principal, en:

$$\bar{w}_{i+1} = \bar{w}_i - \bar{\Phi}_i \bar{y}_i \quad (5.2)$$

Similarmente, para el rayo marginal tenemos:

$$y_{i+1} = y_i + \tau_{i+1} w_{i+1} \quad (5.3)$$

$$w_{i+1} = w_i - \Phi_i y_i \quad (5.4)$$

Por otra parte, si en la expresión:

$$y_i \bar{w}_i - \bar{y}_i w_i \quad (5.5)$$

se substituyen, primeramente, los valores de w_i y \bar{w}_i despejados de las ecuaciones 5.2 y 5.4, respectivamente y luego substituímos, en la expresión que resulte, a \bar{y}_i e y_i encontradas a partir de las ecs. 5.1 y 5.3 se obtiene que:

$$y_i \bar{w}_i - \bar{y}_i w_i = y_{i+1} \bar{w}_{i+1} - \bar{y}_{i+1} w_{i+1} \quad (5.6)$$

ecuación que muestra, por inducción matemática, que la ec. 5.5 es invariante. Se puede reconocer que la ec. 5.5 es el invariante de Lagrange para los rayos principal y marginal:

$$\mathcal{H} = y_i \bar{w}_i - \bar{y}_i w_i \quad (5.7)$$

2.3.- EL DIAGRAMA $y-\bar{y}$ A PARTIR DEL INVARIANTE DE LAGRANGE. (Pupilas de Entrada y de Salida)

Al dividir 5.7 por \mathcal{H} se obtiene lo siguiente:

$$\bar{\Omega}_i y_i - \Omega_i \bar{y}_i = 1 \quad (5.8)$$

donde se define a $\Omega = w/\mathcal{H}$ y $\bar{\Omega} = \bar{w}/\mathcal{H}$.

Si en la ec. 5.8 fijamos los valores de Ω_i y $\bar{\Omega}_i$, lo cual implica fijar el valor del índice de refracción n , se obtiene una línea recta en el diagrama $y-\bar{y}$ con las intersecciones:

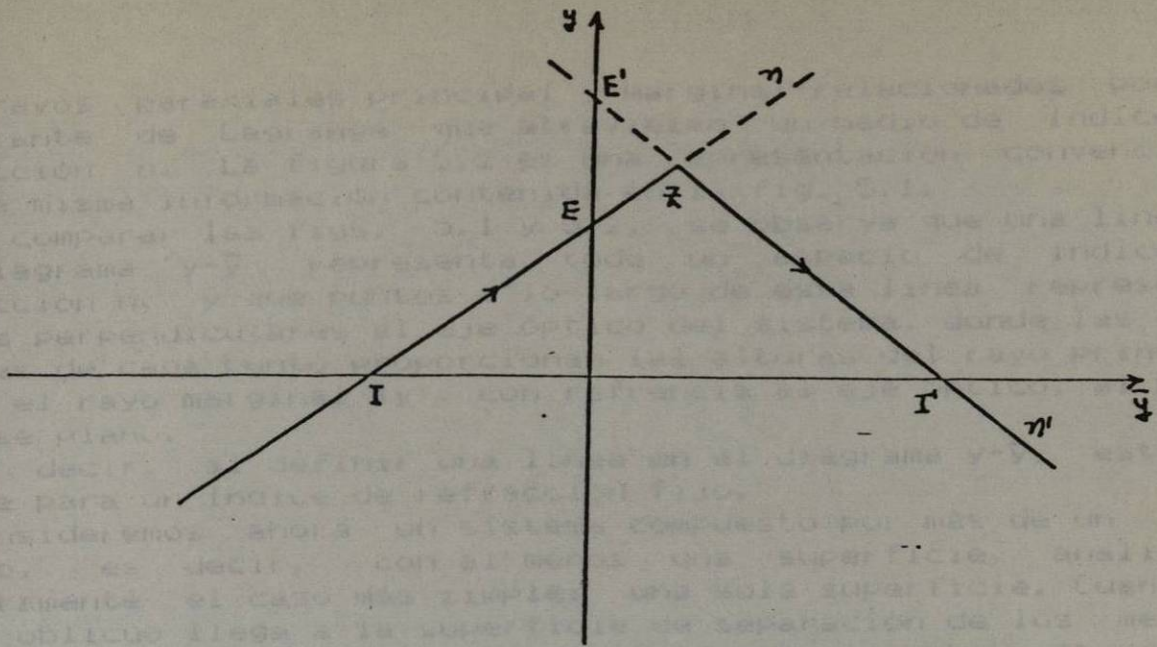
$$\bar{y}^* = -1/\bar{\Omega} = \bar{y}I \quad (5.9a)$$

$$y^* = +1/\Omega = yE \quad (5.9b)$$

las cuales se ilustran en la figura 5.1 donde I ($y=0$) es un punto imagen, E ($\bar{y}=0$) es un punto pupila y Z (\bar{y}, y) es un punto arbitrario. Cualquier punto de intersección con el eje \bar{y} localiza una imagen, y cualquier punto de intersección con el eje y localiza una pupila.

La gráfica de la figura 5.1 contiene toda la información de

a)



b)

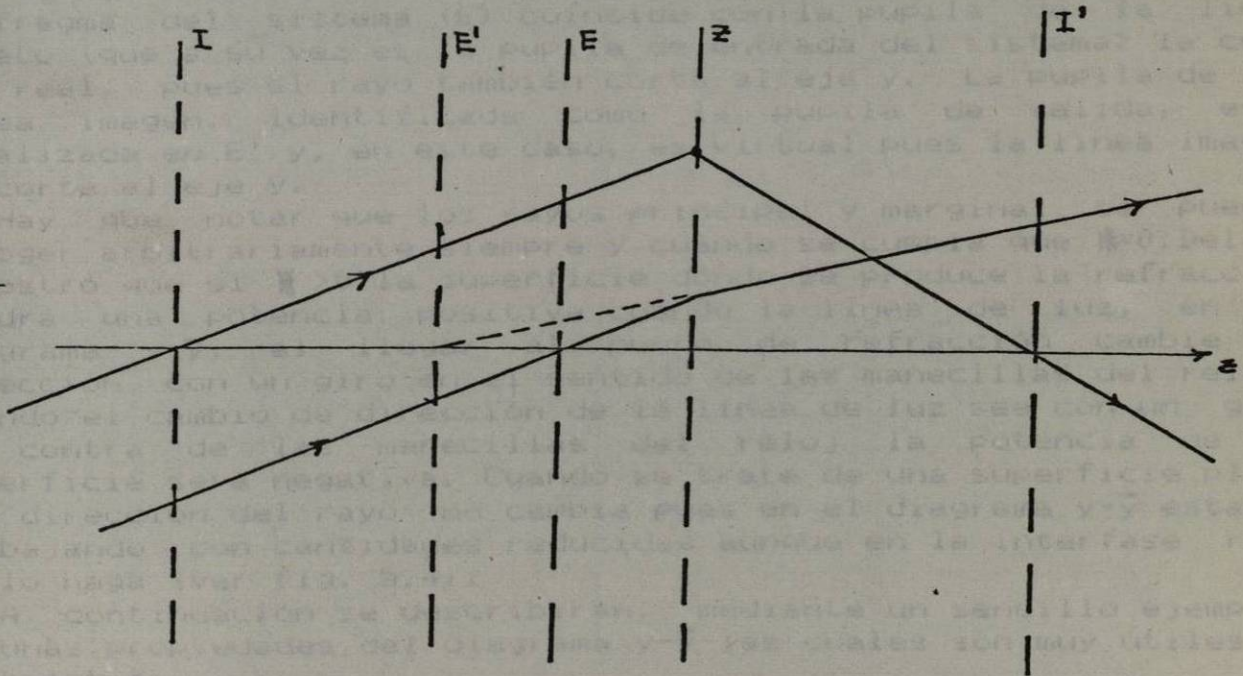


Fig. 5.3 a) Diagrama y-y de los rayos principal y marginal mostrando la refracción que sufren en una superficie colocada en z; en b) se representa el mismo suceso de manera tradicional.

los rayos paraxiales principal y marginal relacionados por el invariante de Lagrange que atraviesan un medio de índice de refracción n . La figura 5.2 es una representación convencional con la misma información contenida en la fig. 5.1.

Al comparar las figs. 5.1 y 5.2, se observa que una línea en el diagrama $y-\bar{y}$ representa todo un espacio de índice de refracción n , y que puntos a lo largo de esta línea representan planos perpendiculares al eje óptico del sistema, donde las coordenadas de cada punto proporcionan las alturas del rayo principal (\bar{y}) y el rayo marginal (y), con referencia al eje óptico, al pasar por ese plano.

Es decir, al definir una línea en el diagrama $y-\bar{y}$, esta se define para un índice de refracción fijo.

Consideremos ahora un sistema compuesto por más de un medio óptico, es decir, con al menos una superficie, analizando primeramente el caso más simple: una sola superficie. Cuando el rayo oblicuo llega a la superficie de separación de los medios, este se refractará obedeciendo la ley de Snell. Las alturas de los rayos original y refractado no variarán en este punto, lo que cambiará es el ángulo del rayo al refractarse. Este hecho lo podemos ver representado en el diagrama $y-\bar{y}$ de la fig. 5.3.

La refracción sucede en el punto Z y el primer segmento de línea, de I a Z caracterizado por el índice de refracción n , es el rayo objeto y el segmento de línea de Z a I' , con un índice de refracción n' , es el rayo imagen. Como las líneas cortan realmente al eje \bar{y} tenemos que las imágenes I e I' son reales y que el diafragma del sistema (E) coincide con la pupila de la línea objeto (que a su vez es la pupila de entrada del sistema) la cual es real, pues el rayo también corta al eje y . La pupila de la línea imagen, identificada como la pupila de salida, está localizada en E' y, en este caso, es virtual pues la línea imagen no corta al eje y .

Hay que notar que los rayos principal y marginal se pueden escoger arbitrariamente siempre y cuando se cumpla que $\bar{y} \neq 0$. Delano demostró que si $\bar{y} > 0$ la superficie donde se produce la refracción tendrá una potencia positiva cuando la línea de luz, en el diagrama $y-\bar{y}$, al llegar al punto de refracción cambie su dirección con un giro en el sentido de las manecillas del reloj. Cuando el cambio de dirección de la línea de luz sea con un giro en contra de las manecillas del reloj la potencia de la superficie será negativa. Cuando se trate de una superficie plana la dirección del rayo no cambia pues en el diagrama $y-\bar{y}$ estamos trabajando con cantidades reducidas aunque en la interfase real si lo haga (ver fig. 5.4).

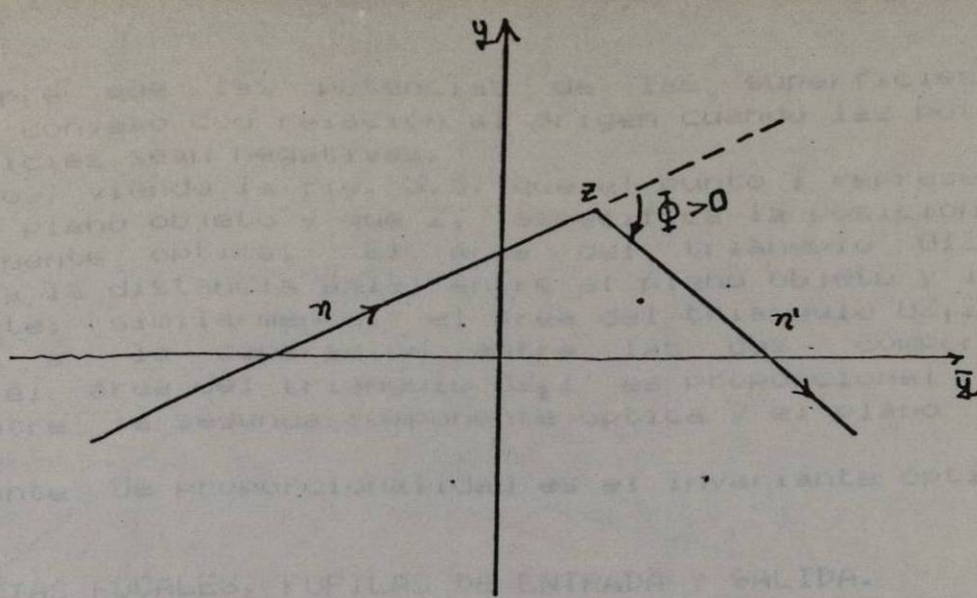
A continuación se describirán, mediante un sencillo ejemplo, algunas propiedades del diagrama $y-\bar{y}$ las cuales son muy útiles en la práctica.

2.4.- SEPARACION ENTRE COMPONENTES DE UN SISTEMA OPTICO Y DISTANCIAS A LOS PLANOS OBJETO E IMAGEN.

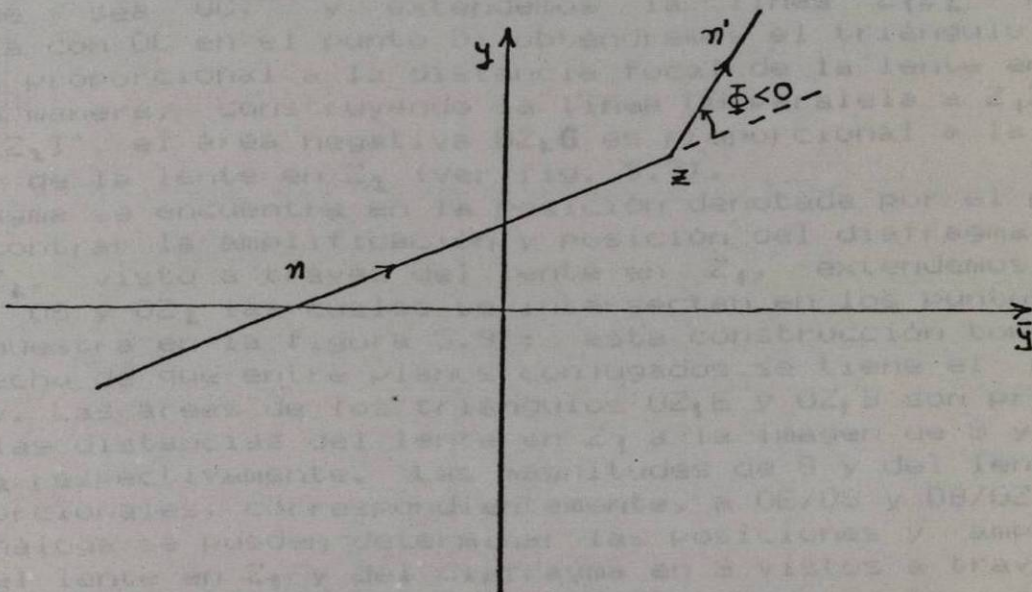
La figura 5.5 muestra el diagrama $y-\bar{y}$ de un sistema óptico del tipo telefoto el cual consiste de dos componentes delgados, separados y trabajando a conjugados finitos.

Delano demostró que el polígono es cóncavo, con relación al

a)



b)



c)

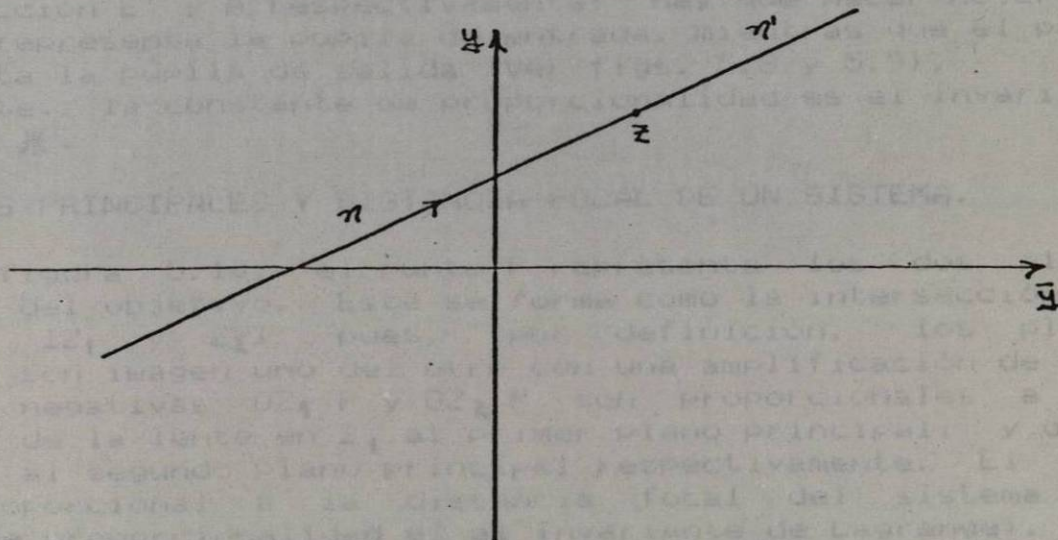


Fig. 5.4 a) Refracción de los rayos principal y marginal en una superficie de potencia positiva colocada en z ;
 b) en una superficie de potencia negativa en z ;
 c) en una superficie plana en z .

origen, siempre que las potencias de las superficies sean positivas, y convexo con relación al origen cuando las potencias de las superficies sean negativas.

Recordaremos, viendo la fig. 5.5, que el punto I representa la posición del plano objeto y que Z_1 especifica la posición de la primer componente óptica. El área del triángulo OIZ_1 es proporcional a la distancia axial entre el plano objeto y la primer componente; similarmente, el área del triángulo OZ_1Z_2 es proporcional a la separación entre las dos componentes; finalmente, el área del triángulo OZ_2I' es proporcional a la distancia entre la segunda componente óptica y el plano imagen (fig. 5.6).

La constante de proporcionalidad es el invariante óptico de Lagrange, \mathcal{H} .

2.5.- DISTANCIAS FOCALES, PUPILAS DE ENTRADA Y SALIDA.

Si se construye una línea paralela a IZ_1 que parta del origen, digamos que sea OC , y extendemos la línea Z_1Z_2 hasta intersectarla con OC en el punto D , obtendremos el triángulo OZ_1D cuya área es proporcional a la distancia focal de la lente en Z_1 ; de la misma manera, construyendo la línea OG paralela a Z_1Z_2 y extendiendo Z_2I' , el área negativa OZ_2G es proporcional a la distancia focal de la lente en Z_2 (ver fig. 5.7).

El diafragma se encuentra en la posición denotada por el punto S . Para encontrar la amplificación y posición del diafragma y la lente en Z_2 , visto a través del lente en Z_1 , extendemos las líneas IZ_1 , OS y OZ_2 las cuales se intersectan en los puntos E y B como se muestra en la figura 5.9; esta construcción toma en cuenta el hecho de que entre planos conjugados se tiene el mismo valor de \bar{y}/y . Las áreas de los triángulos OZ_1E y OZ_1B son proporcionales a las distancias del lente en Z_1 a la imagen de S y del lente en Z_2 respectivamente. Las magnitudes de S y del lente en Z_2 son proporcionales, correspondientemente, a OE/OS y OB/OZ_2 . De una forma análoga se pueden determinar las posiciones y amplificaciones del lente en Z_1 y del diafragma en S vistos a través de la lente en Z_2 . Estas imágenes son representadas por los puntos de intersección E' y A respectivamente; hay que hacer notar que el punto E representa la pupila de entrada, mientras que el punto E' representa la pupila de salida (Ver figs. 5.8 y 5.9).

Nuevamente, la constante de proporcionalidad es el invariante de Lagrange, \mathcal{H} .

2.6.- PLANOS PRINCIPALES Y DISTANCIA FOCAL DE UN SISTEMA.

En la figura 5.10, el punto P representa los dos planos principales del objetivo. Este se forma como la intersección de las líneas IZ_1 y Z_2I' pues, por definición, los planos principales son imagen uno del otro con una amplificación de $+1$. Las áreas negativas OZ_1P y OZ_2P son proporcionales a las distancias de la lente en Z_1 al primer plano principal, y de la lente en Z_2 al segundo plano principal respectivamente. El área OPF es proporcional a la distancia focal del sistema (la constante de Proporcionalidad es el invariante de Lagrange).

No es necesario hacer por separado las figuras 5.6 a la 5.10.

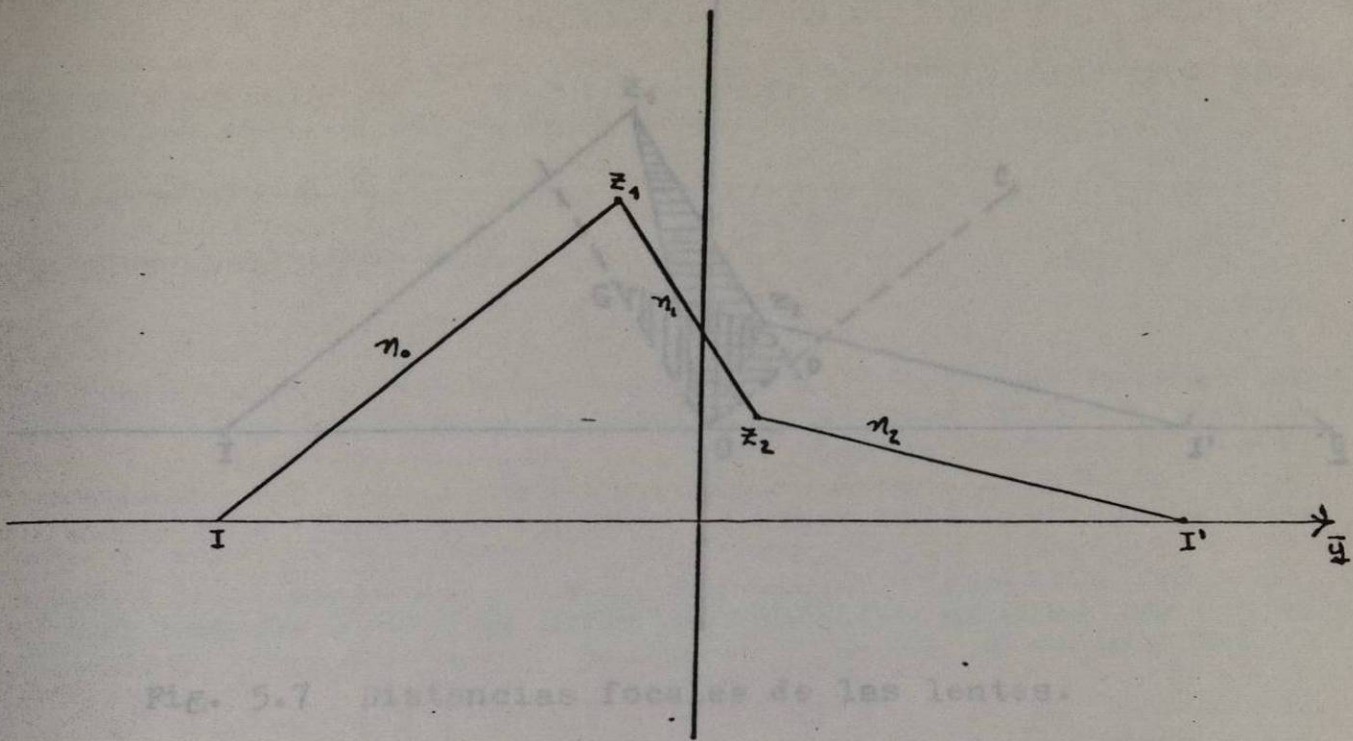


Fig. 5.7 Distancias focales de las lentes.

Fig. 5.5 Diagrama y-y de un sistema telefoto trabajando a conjugados finitos.

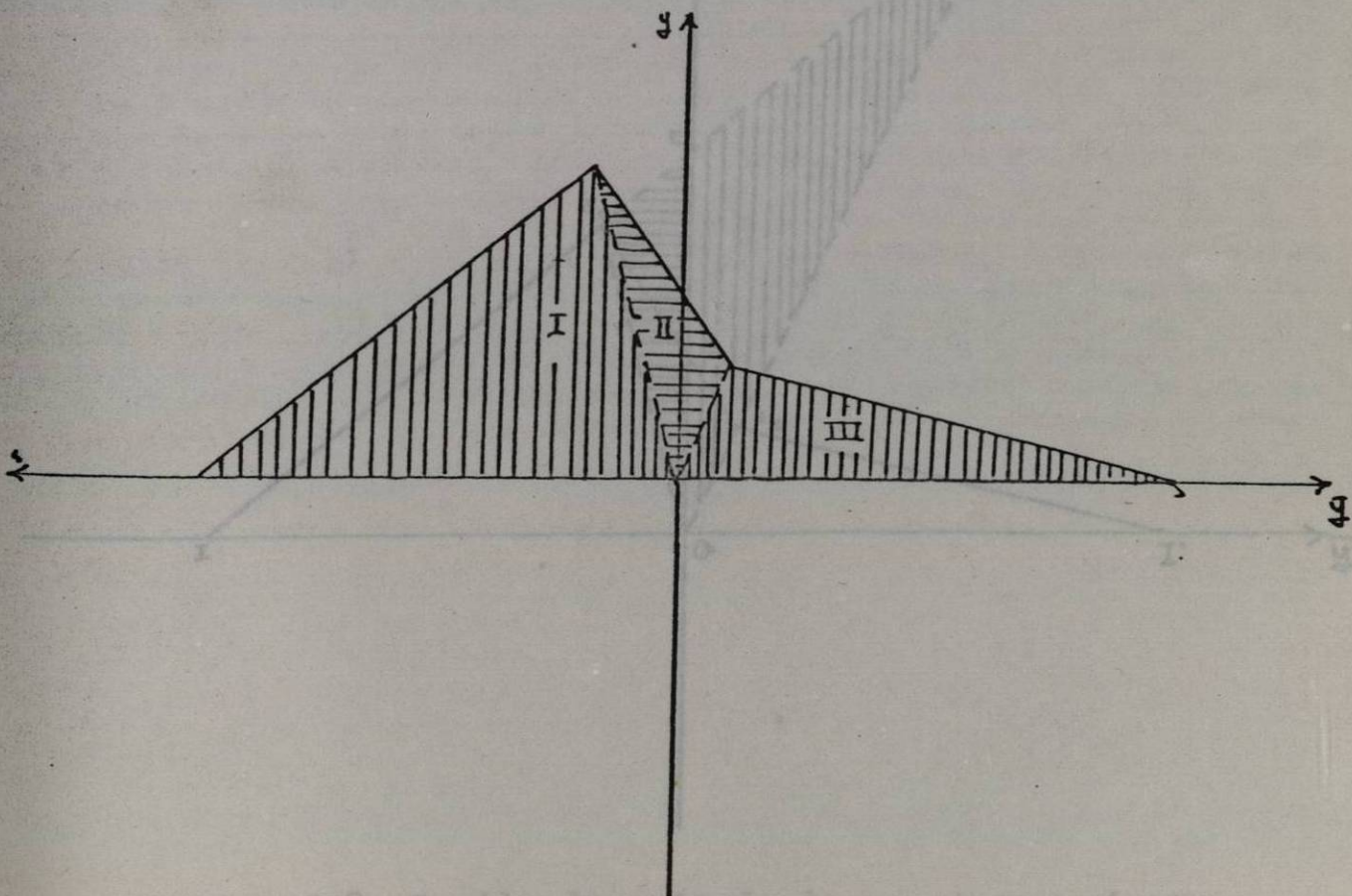


Fig. 5.8 Pupila de entrada de un sistema óptico.

Fig. 5.6 Separación entre las componentes de un sistema óptico y distancias a los planos objeto e imagen.

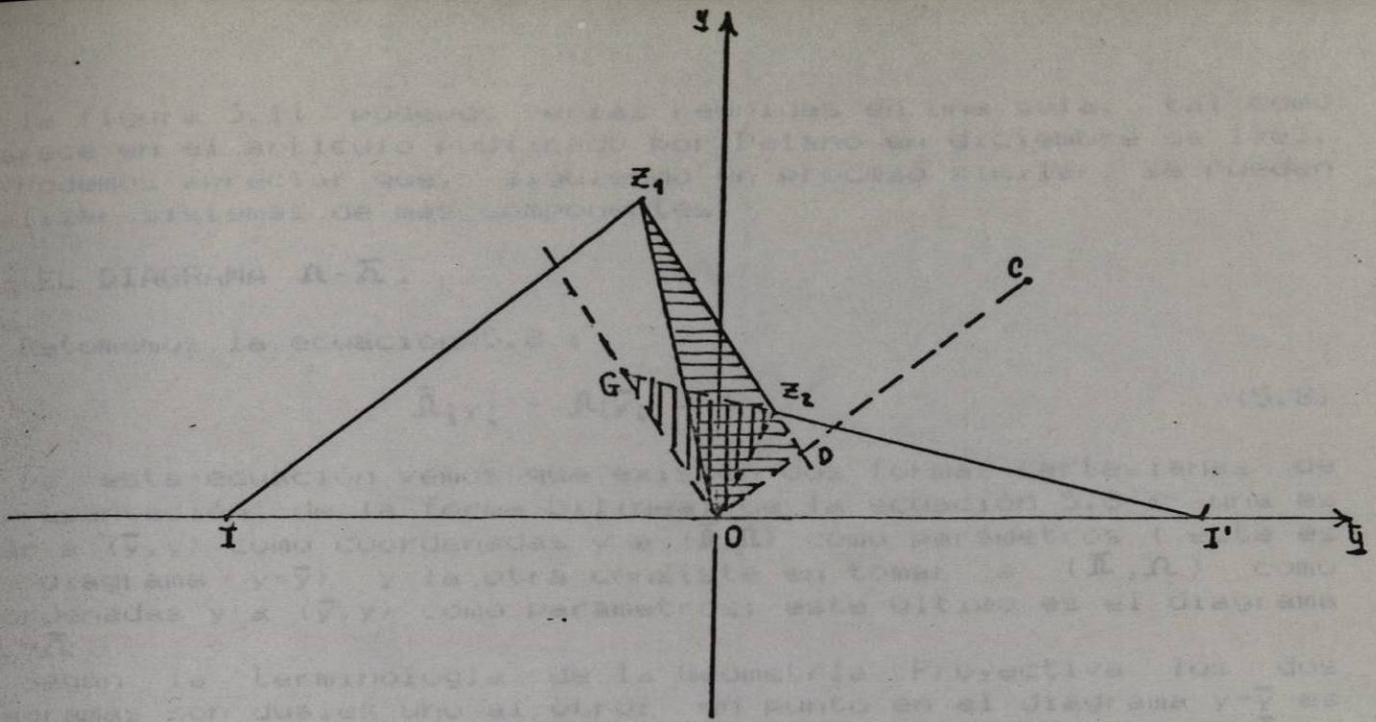


Fig. 5.7 Distancias focales de las lentes.

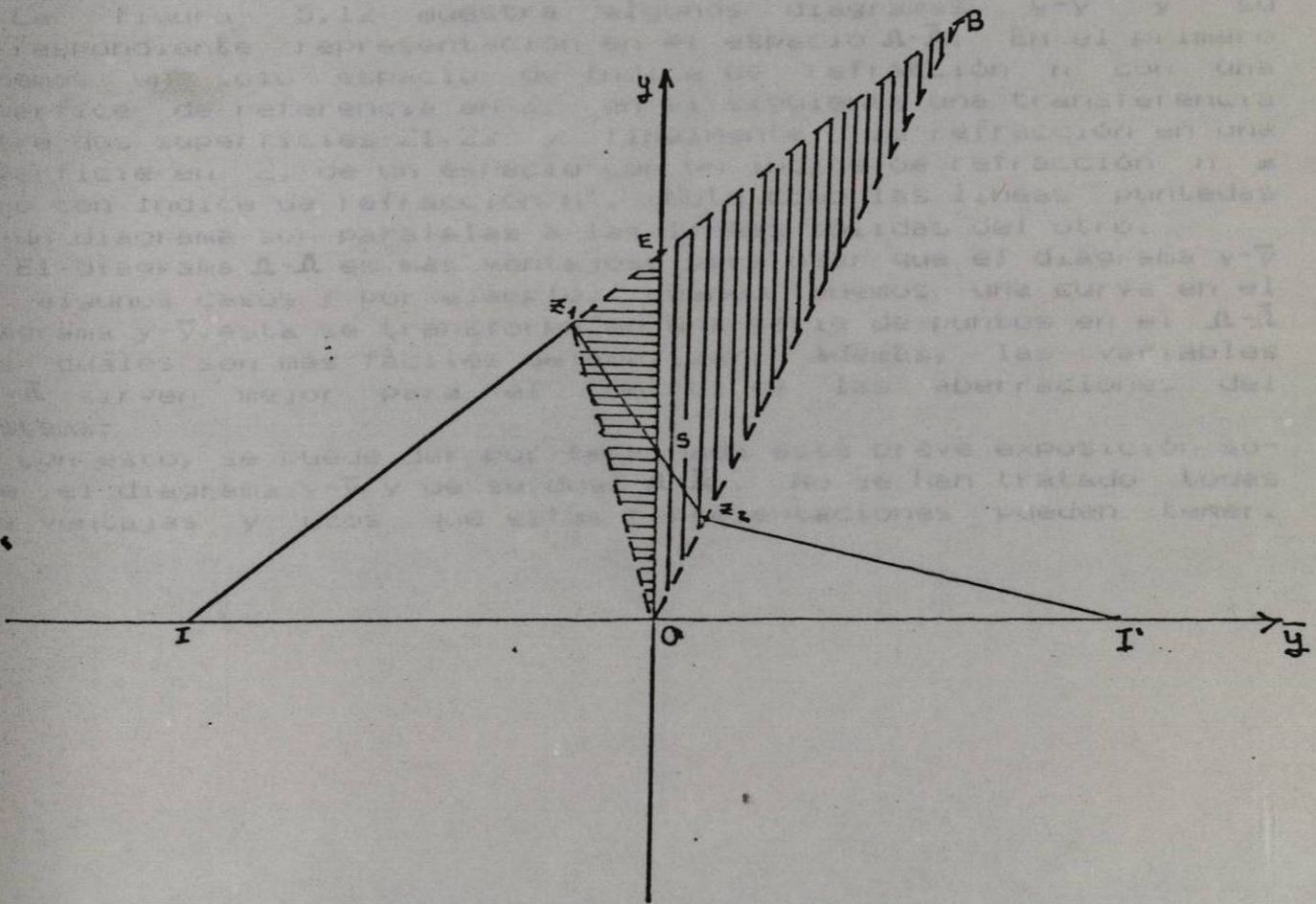


Fig. 5.8 Pupila de entrada de un sistema óptico.

En la figura 5.11 podemos verlas reunidas en una sola, tal como aparece en el artículo publicado por Delano en diciembre de 1963.

Podemos apreciar que, siguiendo un proceso similar, se pueden analizar sistemas de más componentes.

3.- EL DIAGRAMA $\Omega-\bar{\Omega}$.

Retomemos la ecuación 5.8 :

$$\bar{\Omega}_i y_i - \Omega_i \bar{y}_i = 1 \quad (5.8)$$

De esta ecuación vemos que existen dos formas cartesianas de representación de la forma bilineal de la ecuación 5.8 : una es usar a (\bar{y}, y) como coordenadas y a $(\bar{\Omega}, \Omega)$ como parámetros (este es el diagrama $y-\bar{y}$) y la otra consiste en tomar a $(\bar{\Omega}, \Omega)$ como coordenadas y a (\bar{y}, y) como parámetros; este último es el diagrama $\Omega-\bar{\Omega}$.

Según la terminología de la Geometría Projectiva los dos diagramas son duales uno al otro: un punto en el diagrama $y-\bar{y}$ es representado por su dual, una línea, en el diagrama $\Omega-\bar{\Omega}$ y viceversa.

En el diagrama $\Omega-\bar{\Omega}$, un sistema óptico también se representará mediante puntos y líneas que los conectan solo que, en este caso, los puntos representan los espacios, y los segmentos las superficies refractoras.

La figura 5.12 muestra algunos diagramas $y-\bar{y}$ y su correspondiente representación en el espacio $\Omega-\bar{\Omega}$. En el primero tenemos un solo espacio de índice de refracción n con una superficie de referencia en Z ; en el siguiente una transferencia entre dos superficies Z_1, Z_2 y finalmente, la refracción en una superficie en Z , de un espacio con un índice de refracción n a otro con índice de refracción n' . Note como las líneas punteadas de un diagrama son paralelas a las líneas sólidas del otro.

El diagrama $\Omega-\bar{\Omega}$ es más ventajoso para usar que el diagrama $y-\bar{y}$ en algunos casos ; por ejemplo, cuando tenemos una curva en el diagrama $y-\bar{y}$, esta se transforma en una serie de puntos en el $\Omega-\bar{\Omega}$ los cuales son más fáciles de analizar; además, las variables $\Omega-\bar{\Omega}$ sirven mejor para el control de las aberraciones del sistema.

Con esto, se puede dar por terminada esta breve exposición sobre el diagrama $y-\bar{y}$ y de su dual $\Omega-\bar{\Omega}$. No se han tratado todas las ventajas y usos que estas representaciones pueden tener.

Fig. 5.12 Espacios principales de un sistema óptico.

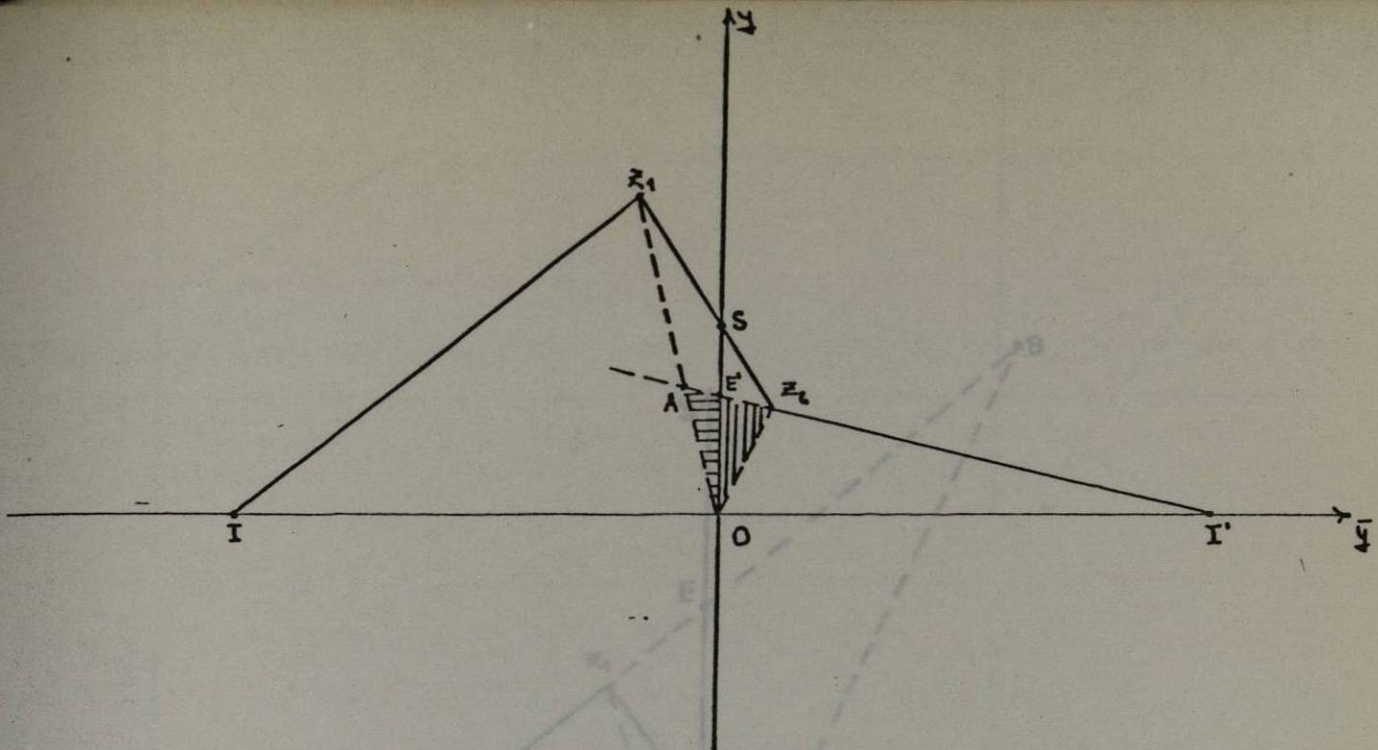


Fig. 5.9 Pupila de salida de un sistema óptico.

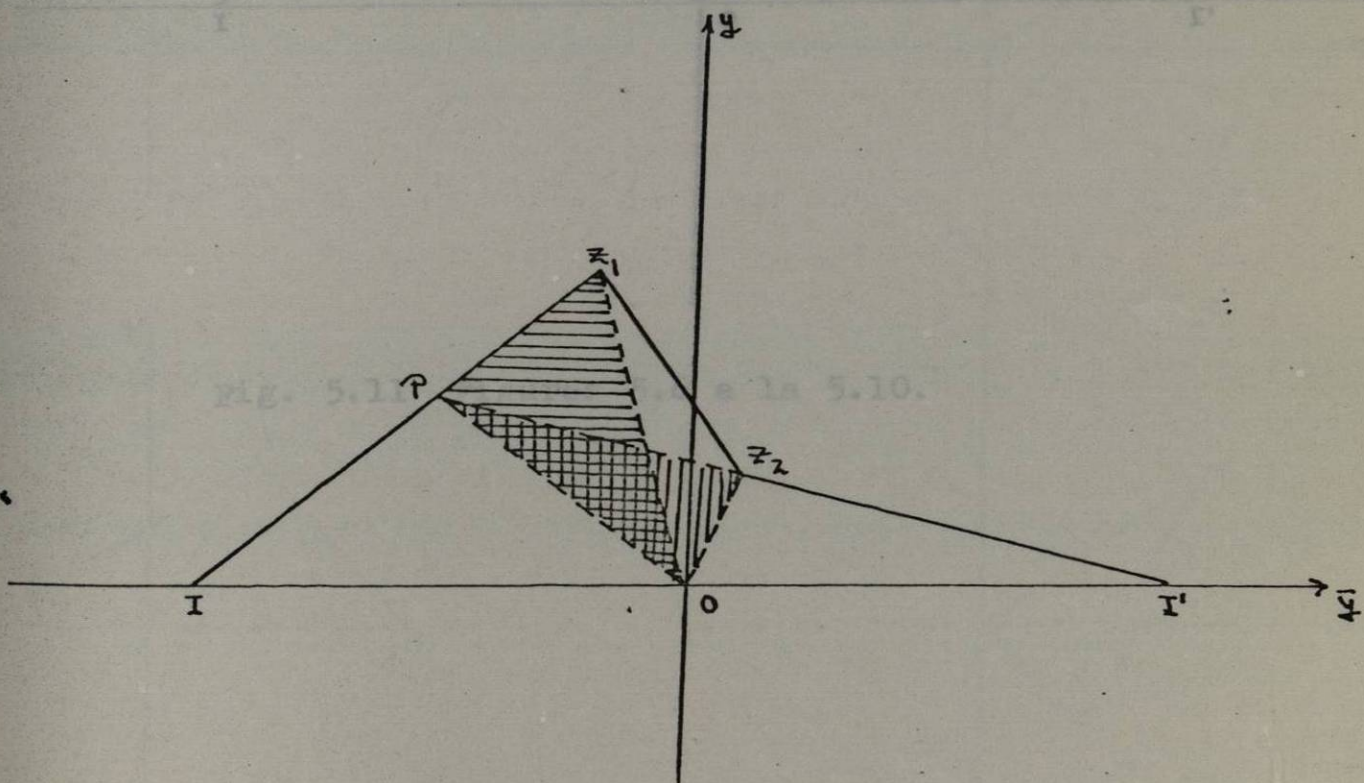


Fig. 5.10 Planos principales de un sistema óptico.

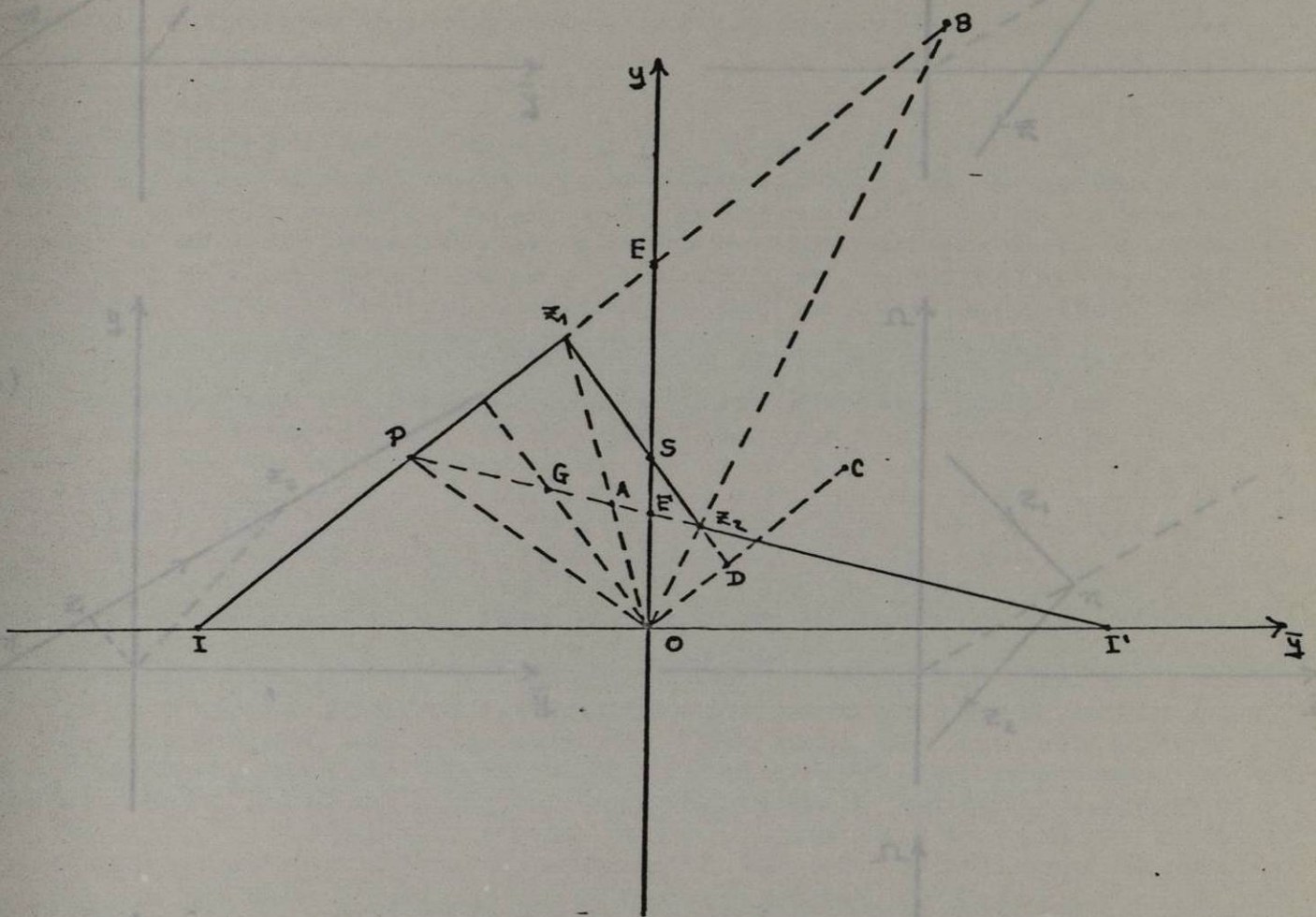


Fig. 5.11 Figuras 5.6 a la 5.10.

Fig. 5.12 Equivalencia entre los diagramas $y-\bar{y}$ y $\bar{n}-\bar{n}$; en a) un espacio con un índice de refracción n ; en b) una transformación entre los puntos z_1 y z_2 , y en c) una refracción en z_1 .

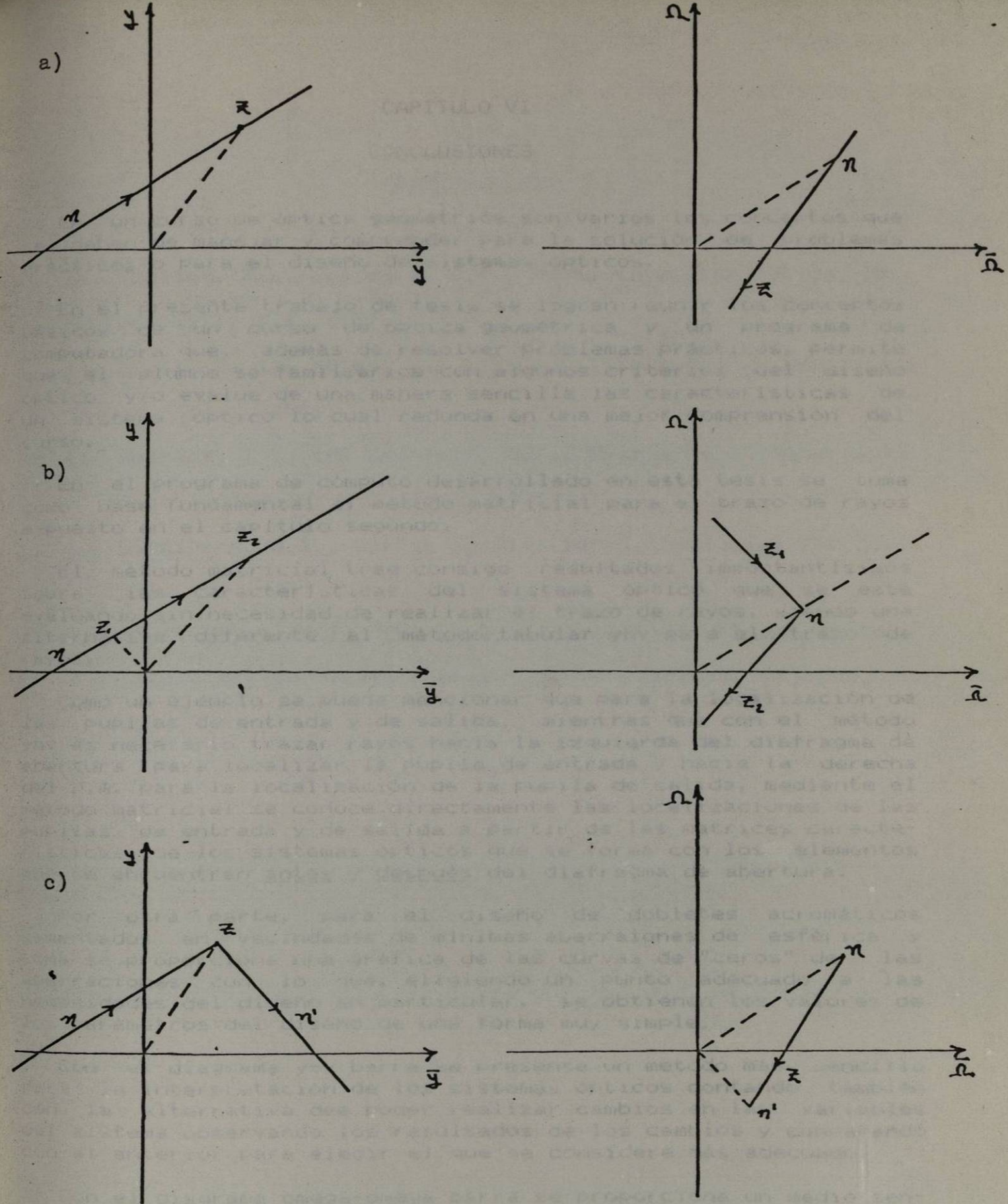


Fig. 5.12 Equivalencias entre los diagramas $y-\bar{y}$ y $\Omega-\bar{\Omega}$; en a) un espacio con un índice de refracción n ; en b) una traslación entre los puntos z_1 y z_2 y en c) una refracción en z_1 .

CAPITULO VI

CONCLUSIONES

En un curso de óptica geométrica son varios los conceptos que se deben de manejar y comprender para la solución de problemas prácticos o para el diseño de sistemas ópticos.

En el presente trabajo de tesis se logran reunir los conceptos básicos de un curso de óptica geométrica y un programa de computadora que, además de resolver problemas prácticos, permite que el alumno se familiarice con algunos criterios del diseño óptico y/o evalúe de una manera sencilla las características de un sistema óptico lo cual redundará en una mejor comprensión del curso.

En el programa de cómputo desarrollado en esta tesis se toma como base fundamental el método matricial para el trazo de rayos expuesto en el capítulo segundo.

El método matricial trae consigo resultados importantísimos sobre las características del sistema óptico que se esté evaluando sin necesidad de realizar el trazo de rayos, siendo una alternativa diferente al método tabular ynv para el trazo de rayos.

Como un ejemplo se puede mencionar que para la localización de las pupilas de entrada y de salida, mientras que con el método ynv es necesario trazar rayos hacia la izquierda del diafragma de abertura para localizar la pupila de entrada y hacia la derecha del D.A. para la localización de la pupila de salida, mediante el método matricial se conoce directamente las localizaciones de las pupilas de entrada y de salida a partir de las matrices características de los sistemas ópticos que se forma con los elementos que se encuentran antes y después del diafragma de abertura.

Por otra parte, para el diseño de dobletes acromáticos cementados en vecindades de mínimas aberraciones de esférica y coma se proporciona una gráfica de las curvas de "ceros" de las aberraciones con lo que, eligiendo un punto adecuado a las necesidades del diseño en particular, se obtienen los valores de los parámetros del diseño de una forma muy simple.

Con el diagrama y-y barra se presenta un método más sencillo para la interpretación de los sistemas ópticos contando también con la alternativa de poder realizar cambios en las variables del sistema observando los resultados de los cambios y comparando con el anterior para elegir el que se considere más adecuado.

Con el diagrama omega-omega barra se proporciona un medio sencillo para el análisis de las propiedades a primer orden del sistema óptico en cuestión, al igual que el diagrama ye-ye barra.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- Jenkins, F.A. and White H.E., Fundamentals of optics, Mc Graw Hill, N.Y., 1957.
- 2.- Hecht, E. and Zajac, A., Optics, Addison-Weslwy Publishing Co., Inc., 1974.
- 3.- Begunov, B.N. and Zakaznov, N.P., Teoría de sistemas ópticos, Editorial Mir Moscú, 1976.
- 4.- Landsberg, G.S., Optica (primer tomo), Editorial Mir Moscú 1976.
- 5.- López López, F.J., The application of the Delano y-y to optical design, Tesis doctoral, Universidad de Arizona, 1973.

- PROGRAMA PRINCIPAL:
- 1.- CARGA DE DATOS Y TRAZADO DE RAYOS
 - 2.- TRAZO DE RAYOS
 - 3.- CALCULO DE ABERRACIONES
 - 4.- CORRECCION DE DATOS
 - 5.- IMPRESIONES
 - 6.- CALCULO DE DOBLETES ACROMATICOS EN VECINDADES DE MINIMAS ABERRACIONES
 - 7.- DIAGRAMA y-y barra
 - 8.- SALIDA DEL SISTEMA

OPCION DESEADA ==>>> 1

Una vez que se ha elegido una opción se teclea el número a que corresponda y se pulsa <ENTER> (en lo sucesivo, una vez que se de cualquier dato y/o respuesta se debe pulsar <ENTER>).

EJEMPLO 1: CARGA DE DATOS Y TRAZADO DE RAYOS.

Se desean cargar los datos del siguiente sistema optico:

APENDICE A

A1.- DESCRIPCION DEL PROGRAMA.

Para hacer uso del programa computacional desarrollado en esta tesis se debe contar con un disco flexible de 5" 1/4 el cual pueda ser usado en cualquier compatible PC-dos. En caso de no contar con una computadora compatible se debe cargar el listado del programa al sistema deseado (apéndice 3).

El lenguaje que se usa es Basic y dado que el programa ya ha sido compilado y encadenado solamente es necesario llamarlo directamente por su nombre OPT1:

```
>A OPT1 <ENTER>
```

Una vez que se procede de esa manera aparece la primera pantalla del sistema pudiendo elegir la opción que se desee:

PROGRAMA PRINCIPAL:

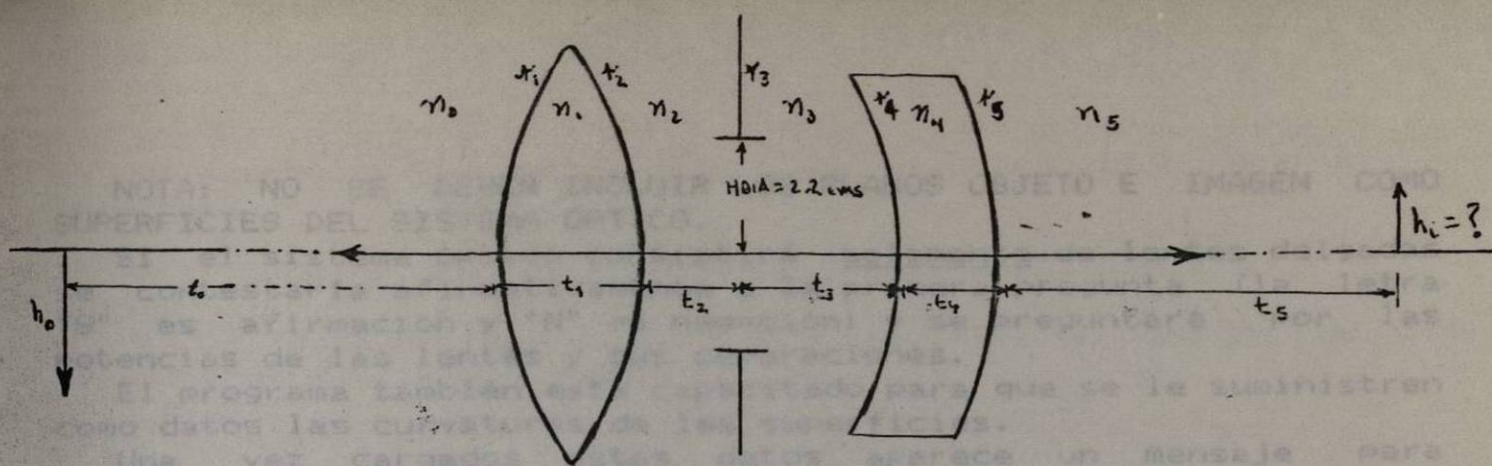
- 1.- CARGA DE DATOS
Y TRAZADO DE RAYOS
- 2.- TRAZO DE RAYOS
- 3.- CALCULO DE ABERRACIONES
- 4.- CORRECCION DE DATOS
- 5.- IMPRESIONES
- 6.- CALCULO DE DOBLETES ACROMATICOS EN
VECINDADES DE MINIMAS ABERRACIONES
- 7.- DIAGRAMA y-y barra
- 8.- SALIDA DEL SISTEMA

```
OPCION DESEADA ====>? 1
```

Una vez que se ha elegido una opción se teclea el número a que corresponda y se pulsa <ENTER> (en lo sucesivo, una vez que se de cualquier dato y/o respuesta se debe pulsar <ENTER>).

EJEMPLO 1: CARGA DE DATOS Y TRAZADO DE RAYOS.

Se desean cargar los datos del siguiente sistema óptico:



donde

$n_0 = 1$	$t_0 = 125$	$r_1 = 25$ cms.	$h_0 = -7$
$n_1 = 1.516$	$t_1 = 1.2$	$r_2 = -37$	
$n_2 = 1$	$t_2 = 0.7$	$r_3 = \text{infinito}$	
$n_3 = 1$	$t_3 = 1.6$	$r_4 = -45$	
$n_4 = 1.534$	$t_4 = 1.4$	$r_5 = -15$	
$n_5 = 1$	$t_5 = ?$		

Este sistema óptico está formado por 5 superficies con radios de curvaturas r_1, r_2, r_3, r_4 y r_5 separadas a distancias t_1, t_2, t_3 y t_4 donde los medios en que viajan los rayos poseen índices de refracción n_0, n_1, n_2, n_3, n_4 y n_5 .

El plano objeto se encuentra a una distancia t_0 de la primera superficie del sistema óptico y el objeto tiene una altura h_0 .

En la figura A1.1 se puede observar que el diafragma de apertura corresponde a la tercera superficie y posee una altura dada por HDIA.

Para cargar estos datos en el programa se puede así:

ENTRADA DE DATOS

```

EL SISTEMA SON LENTES DELGADAS (S/N)? N
CUANTAS SUPERFICIES FORMAN EL SISTEMA? 5
CUAL ES EL INDICE DE REFRACCION DEL MEDIO 0 ? 1
CUAL ES EL INDICE DE REFRACCION DEL MEDIO 1 ? 1.516
CUAL ES EL INDICE DE REFRACCION DEL MEDIO 2 ? 1
CUAL ES EL INDICE DE REFRACCION DEL MEDIO 3 ? 1
CUAL ES EL INDICE DE REFRACCION DEL MEDIO 4 ? 1.534
CUAL ES EL INDICE DE REFRACCION DEL MEDIO 5 ? 1
PROPORCIONA LOS RADIOS DE CURVATURA (S/N)? S
EL RADIO DE CURVATURA DE LA SUP. 1 ES INFINITO (S/N)? N
PROPORCIONE EL RADIO DE CURVATURA DE LA SUP. 1 ? 25
EL RADIO DE CURVATURA DE LA SUP. 2 ES INFINITO (S/N)? N
PROPORCIONE EL RADIO DE CURVATURA DE LA SUP. 2 ? -37
EL RADIO DE CURVATURA DE LA SUP. 3 ES INFINITO (S/N)? S
EL RADIO DE CURVATURA DE LA SUP. 4 ES INFINITO (S/N)? N
PROPORCIONE EL RADIO DE CURVATURA DE LA SUP. 4 ? -45
EL RADIO DE CURVATURA DE LA SUP. 5 ES INFINITO (S/N)? N
PROPORCIONE EL RADIO DE CURVATURA DE LA SUP. 5 ? -15
  
```

NOTA: NO SE DEBEN INCLUIR LOS PLANOS OBJETO E IMAGEN COMO SUPERFICIES DEL SISTEMA OPTICO.

Si el sistema óptico consistirá solamente de lentes delgadas se contestaría afirmativamente a la primera pregunta (la letra "S" es afirmación y "N" es negación) y se preguntará por las potencias de las lentes y sus separaciones.

El programa también está capacitado para que se le suministren como datos las curvaturas de las superficies.

Una vez cargados estos datos aparece un mensaje para suministrar las separaciones entre las superficies; nuevamente NO SE DEBEN INCLUIR LAS SEPARACIONES A LOS PLANOS OBJETO E IMAGEN.

LA DISTANCIA PLANO OBJETO-PRIMERA SUPERFICIE
SE PREGUNTARA DESPUES

CUAL ES LA SEPARACION ENTRE LA SUP. 1 Y LA 2 ? 1.2
CUAL ES LA SEPARACION ENTRE LA SUP. 2 Y LA 3 ? .7
CUAL ES LA SEPARACION ENTRE LA SUP. 3 Y LA 4 ? 1.6
CUAL ES LA SEPARACION ENTRE LA SUP. 4 Y LA 5 ? 1.3

En la parte baja de la pantalla se pregunta si se desea corregir algún dato, esto es cuando se ha cometido algún error al suministrar los datos. Suponiendo que es así se suministra:

DESEA CORREGIR ALGUN DATO (S/N)? S

después de lo cual se crea la pantalla de correcciones:

CORRECCIONES

NÚMERO DE SUPERFICIE? 1

- 1.- RADIOS DE CURVATURA (S/N)? N
- 2.- CURVATURAS
- 3.- INDICES DE REFRACCION
- 4.- SEPARACION ENTRE SUPERFICIES (S/N)? 25
- 5.- CANCELACION DE SUPERFICIES
- 6.- REGRESO AL PROGRAMA PRINCIPAL

A continuación aparece la pregunta:

DESEA CLAREAR OTRO RADIO DE CURVATURA (S/N)? N

en el caso afirmativo se preguntará por el radio de curvatura de la superficie que ya se corrigió; en el caso negativo aparece la pantalla de correcciones. Si no hay otro tipo de correcciones que hacer se pide la opción

Al escoger una opción (según sea la corrección) aparece la pregunta:

DESEA VER LOS PARAMETROS QUE HA DADO (S/N)? S

En el caso afirmativo aparece en pantalla un listado de los parámetros que se han dado:

I M P R E S I O N E S

```
*****
SUPERFICIE          CURVATURA          DISTANCIA ENTRE          INDICE DE
  (II)              (I)              SUPERFICIES (I,I+1)     REFRACCION
*****
```

SUPERFICIE (II)	CURVATURA (I)	DISTANCIA ENTRE SUPERFICIES (I,I+1)	INDICE DE REFRACCION
1.000000	0.040000		1.000000
2.000000	-0.027027	1.200000	1.516000
3.000000	0.000000	0.700000	1.000000
4.000000	-0.022222	1.600000	1.000000
5.000000	-0.066667	1.300000	1.534000
			1.000000

```
*****
```

OPRIMA <RET> PARA CONTINUAR?

y al oprimir <ENTER>:

CORRECCION DE RADIOS DE CURVATURA

DESEA TRAZAR DOS RAYOS DIFERENTES A LOS RAYOS MARG.
NUMERO DE SUPERFICIE? 1

EL NUEVO VALOR ES INFINITO (S/N)? N

PROPORCIONE EL NUEVO VALOR DE RADIO DE CURVATURA? 25

A continuación aparece la pregunta:

DESEA CORREGIR OTRO RADIO DE CURVATURA (S/N)? N

en el caso afirmativo se repetirán las preguntas que ya se vieron; en el caso negativo aparece la pantalla de CORRECCIONES. Si no hay otro tipo de correcciones que hacer se pide la opción

DISTANCIA FOCAL PRINCIPAL:

19.14372

DISTANCIA FOCAL POSTERIOR:

6: REGRESO AL PROGRAMA PRINCIPAL, con lo que el programa sigue su marcha.

DISTANCIA FOCAL SECUNDARIA:

19.14372

DISTANCIA FOCAL POSTERIOR:

16.06134

OPRIMA <RET> PARA CONTINUAR?

PLANO PRINCIPALES Y PUNTOS NODALES:

DISTANCIA ENTRE TRAZO DE RAYOS SUPERFICIE Y EL PRIMER PUNTO PRINCIPAL:

2.061873

DISTANCIA ENTRE EL VERTICE DE LA ULTIMA SUPERFICIE Y EL PRIMER PUNTO PRINCIPAL:

DISTANCIA PLANO OBJETO-1era. SUP. ES INFINITO(S/N)? N

PRIM DISTANCIA PLANO OBJETO-1era. SUPERFICIE: ? 125

SEGUN DISTANCIA ULTIMA SUP.-PLANO IMAGEN: 19.07213

PUPILAS DE ENTRADA Y DE SALIDA:

PARA EL TRAZO DE RAYOS, Y1 SE REFIERE AL RAYO MARGINAL E Y2 AL RAYO PRINCIPAL

PUPILA DE SALIDA: -2.6433

OPRIMA <RET> PARA CONTINUAR)?

ALTURA DE LA P.S.: 2.3622

ALTURA DE LA P.S.: 2.3622

OPRIMA <RET> PARA CONTINUAR?

DESEA TRAZAR DOS RAYOS DIFERENTES A LOS RAYOS MARGINAL Y PRINCIPAL (S/N)? N

SUPERFICIE (I)	ALTURA DEL RAYO MARGINAL	ANGULO DE SALIDA	ALTURA DEL RAYO PRINCIPAL	ANGULO DE SALIDA
0.000000	0.000000	0.017500	-7.000000	0.050601
1.000000	2.167523	-0.027650	-0.046164	0.058384
2.000000	2.167636	-0.057852	-0.001375	0.056603
3.000000	2.125142	-0.057852	0.038247	0.056603
4.000000	2.032078	-0.030732	0.128812	0.050131
5.000000	2.003792	-0.105075	0.178073	0.031792
6.000000	-0.000000	0.000000	1.160951	0.000000

DESEA OBSERVAR LOS RESULTADOS (S/N)?

OPRIMA <RET> PARA CONTINUAR?

ESPACIO OBJETO:

DISTANCIA FOCAL PRINCIPAL: 18.14372

DISTANCIA FOCAL ANTERIOR: 16.05028

ESPACIO IMAGEN:

DISTANCIA FOCAL SECUNDARIA: 18.14372

DISTANCIA FOCAL POSTERIOR: 16.06184

OPRIMA <RET> PARA CONTINUAR?

PUNTOS PRINCIPALES Y PUNTOS NODALES:

DISTANCIA ENTRE EL VERTICE DE LA PRIMER SUPERFICIE Y EL PRIMER PUNTO PRINCIPAL: 2.081875

DISTANCIA ENTRE EL VERTICE DE LA ULTIMA SUPERFICIE Y EL SEGUNDO PUNTO PRINCIPAL: -2.09344

PRIMER PUNTO NODAL: -2.081875

SEGUNDO PUNTO NODAL: -2.093441

PUPILAS DE ENTRADA Y DE SALIDA:

PUPILA DE ENTRADA: -1.546281

PUPILA DE SALIDA: -2.645323

ALTURA DE LA P.E.: 2.292594

ALTURA DE LA P.S.: 2.362329

OPRIMA <RET> PARA CONTINUAR?

*****RESULTADOS DEL TRAZO DE RAYOS EN LA REGION PARAXIAL*****

SUPERFICIE (I)	ALTURA DEL RAYO MARGINAL	ANGULO DE SALIDA	ALTURA DEL RAYO PRINCIPAL	ANGULO DE SALIDA
0.000000	0.000000	0.017500	-7.000000	0.055631
1.000000	2.187525	-0.027650	-0.046164	0.056584
2.000000	2.165638	-0.057852	-0.001375	0.056603
3.000000	2.125142	-0.057852	0.038247	0.056603
4.000000	2.032578	-0.033732	0.128812	0.058131
5.000000	2.003992	-0.105075	0.178075	0.051792
6.000000	-0.000000	0.000000	1.165851	0.000000

OPRIMA <RET> PARA CONTINUAR?

Después de lo cual aparece nuevamente la pantalla del programa principal descrita anteriormente.

A continuación se explicará el uso de las demás alternativas dadas por el programa principal.

Una vez que se han cargado los datos y se ha realizado el trazo de rayos estamos listos para el calculo de las aberraciones del sistema óptico en cuestión (opción 3) siempre y cuando se conteste en forma negativa a la pregunta sobre el trazo de dos rayos diferentes a los rayos marginal y principal (por esta razón es que se ha incluido la opción 2: TRAZO DE RAYOS, pues de esa manera se pueden trazar diferentes rayos aparte del marginal y el principal).

Suponiendo que se hayan trazado los rayos principal y marginal se pregunta en pantalla sobre los números de Abbe de los medios del sistema óptico al que corresponden los datos que hemos cargado en la parte de CARGA DE DATOS: para el aire se tiene un número de Abbe de un millón, este dato se puede dar como 1E06.

La opción cuatro: CORRECCION DE DATOS, se despliega en pantalla tal y como se describió en el ejemplo al contestar afirmativamente a la pregunta sobre si se desea hacer alguna corrección en los datos.

En la opción cinco: IMPRESIONES, se listan los parámetros del sistema óptico evaluado así como los resultados del trazo de rayos en la región paraxial y los puntos cardinales del sistema incluyendo las pupilas de entrada y de salida. Dado que no siempre se desea imprimir en papel, los resultados solo aparecen en pantalla; para imprimirlos en papel solo es necesario pulsar al mismo tiempo las teclas <Shift> y <PrtSc>.

En la opción seis: CALCULO DE DOBLETES ACROMATICOS EN VECINDADES DE MINIMAS ABERRACIONES se tiene la capacidad de diseñar dobletes acromáticos cementados que cumplan con ciertas características de nuestro interés: potencia deseada, los índices de refracción y los números de Abbe de las lentes que poseemos para el doblete, el grosor mínimo que pueden poseer las componentes del doblete así como la altura permitida al doblete.

Como otros parámetros hay que incluir el valor central que debe poseer el factor de cromaticidad (se recomienda como valor central el 1) y el incremento de éste y de las curvaturas para la obtención de diferentes diseños. Finalmente se pide el valor de aproximación, esto es el valor al cual podemos asumir que una aberración tiene un valor de "cero".

Ejemplo 2.- Supongamos que se desea diseñar una doblete acromático cementado de la mejor calidad posible (esto es que posea mínimos valores de aberraciones) y con una distancia focal de 20 cms.

La altura máxima que debe poseer el doblete para nuestros fines es de 2.5 cms.

De la experiencia sabemos que dos vidrios ópticos de buena calidad para un doblete acromático son el BK7 y F2 cuyos índices de refracción y números de Abbe son:

BK7: $n = 1.51673$ No. de Abbe: 64.17

F2 : $n = 1.61989$ No. de Abbe: 36.37

Además, sabemos que para que las componentes sean físicamente realizables y se disminuya el costo, el espesor mínimo que puede poseer la lente negativa es de 0.5 cms.

Con todos estos datos ya estamos listos para hacer uso de la opción seis del Programa:..

CALCULO DE DOBLETES ACROMATICOS EN LAS VECINDADES DE MINIMAS ABERRACIONES ESFERICA Y COMA

PROPORCIONE LA POTENCIA DESEADA? .05

INDICE DE REFRACCION DE LA PRIMERALENTE? 1.51673
NUMERO DE ABBE DE LA PRIMERALENTE? 64.17

INDICE DE REFRACCION DE LA SEGUNDALENTE? 1.61989
NUMERO DE ABBE DE LA SEGUNDALENTE? 36.37

GROSOR MINIMO? .5

ALTURA PERMITIDA DEL DOBLETE? 2.5

VALOR CENTRAL DEL FACTOR DE CROMATICIDAD? 1

INCREMENTO DEL FACTOR DE CROMATICIDAD? .1

FACTOR DE INCREMENTO DE LA CURVATURA? .03

VALOR DE APROXIMACION? .000001

Después de haber dado el último dato aparece en la parte inferior de la pantalla el mensaje

(CALCULANDO)

Habrá que esperar unos 5 minutos hasta que se despliegue en pantalla la gráfica de las curvas de "ceros de las aberraciones" para el doblete que queremos diseñar.

Para elegir un diseño solo es necesario suministrar la distancia dirigida al eje "x" en las unidades en que está dividida la pantalla y posteriormente se despliegan los parámetros que le corresponden a ese diseño pudiéndolo aceptar o rechazarlo para elegir otro punto.

En la opción siete: DIAGRAMA y-y barra, se despliega en Pantalla el diagrama y-y barra del sistema óptico evaluado. Para esto es necesario que se haya trazado los rayos principal y marginal a través del sistema óptico. En esa misma pantalla aparece un menú para el listado de las variables así como para el cambio de alguna de ellas con la intención de alterar el sistema sin modificar las distancias objeto e imagen. Solo en el caso de que se modifique algún índice de refracción se alterarán los Parámetros distancia plano-objeto, plano-imagen ya que al hacer un cambio en un índice de refracción se esta alterando todo el sistema en sus propiedades.

Dentro del menú del diagrama y-y barra se tiene el diagrama Omega-omega barra. Se procedió de esa manera por ser mas manejable el diagrama omega-omega barra en este punto del Programa.

Para salir del sistema se pulsa la opción ocho.

Radio de curvatura de la superficie 1.

Potencia de la lente L.

Altura del rayo marginal en la primera superficie.

Altura del rayo principal en la primera superficie.

Angulo de salida del rayo marginal después de refractarse en la primera superficie medido a partir del eje óptico.

Angulo de salida del rayo principal después de refractarse en la primera superficie medido a partir del eje óptico.

Numero de Abbe del medio L. Rayo Gti medio.

Invariante de Lagrange para los rayos principal y marginal.

Angulo de incidencia del rayo marginal en la primera superficie medido con respecto a la normal a la superficie.

Angulo de incidencia del rayo principal en la primera superficie medido con respecto a la normal a la superficie.

Valor de la aberración esférica.

Valor de la aberración de coma.

Valor de la aberración de astigmatismo.

Valor de la aberración de curvatura de Petzval.

Valor de la aberración distorsión.

APENDICE B

B1.1.-LISTA DE VARIABLES.

- S : Numero de superficies que forman el sistema óptico.
Valor máximo 20.
- RN(I): Índice de refracción del medio I. Hay S+1 medios.
- D(I): Separación entre la superficie I e I+1. Hay S-1 separaciones.
- CUR(I): Curvatura de la superficie I.
- R(I): Radio de curvatura de la superficie I.
- PPO(I): Potencia de la lente I.
- Y(1,K): Altura del rayo marginal en la k-ésima superficie.
- Y(2,K): Altura del rayo principal en la k-ésima superficie.
- ALFA(1,K): Angulo de salida del rayo marginal después de refractarse en la k-ésima superficie medido a partir del eje óptico.
- ALFA(2,K): Angulo de salida del rayo principal después de refractarse en la k-ésima superficie medido a partir del eje óptico.
- ABBE(I): Número de Abbe del medio I. Hay S+1 medios.
- GAMA: Invariante de Lagrange para los rayos principal y marginal.
- PHI(1): Angulo de incidencia del rayo marginal en la k-ésima superficie medido con respecto a la normal a la superficie.
- PHI(2): Angulo de incidencia del rayo principal en la k-ésima superficie medido con respecto a la normal a la superficie.
- ESF: Valor de la aberración esférica.
- COMA: Valor de la aberración de coma.
- AST: Valor de la aberración de astigmatismo.
- PETZ: Valor de la aberración curvatura de Petzval.
- DIST: Valor de la aberración distorsión.

CDCAM: Valor de la aberración curvatura de campo.
 CRMAX: Valor de la aberración cromática axial.
 CRMAL: Valor de la aberración cromática lateral.
 POT: Potencia de una superficie.
 PHIO: Potencia deseada para el diseño de dobletes acromáticos en vecinidades de minimas aberraciones esférica y coma.
 FOCO: Distancia focal calculada a partir de PHIO.
 ZMIN: Grosor mínimo de cada una de las componentes del doblete acromático cementado.
 YY: Altura máxima permitida para el doblete medida a partir del eje óptico.
 FK(3): Valor central del factor de cromaticidad.
 DELK: Incremento del factor de cromaticidad.
 DELCi: Incremento del factor de curvatura de la superficie número i del doblete.
 EPSI: Valor máximo permitido para considerar "cero" a una aberración.
 PIA: Potencia de la primer componente del doblete.
 PIB: Potencia de la segunda componente del doblete.
 EQN: Índice de refracción equivalente.
 SAG(K): Valor de la sagita de la k-ésima superficie del doblete.
 DSAG(K): Valor de la diferencia de sagitas entre la k-ésima y (k+1)-ésima superficies del doblete.
 EFE: Número efe del sistema.
 ABR(I,L,M): Valor de la aberración del tipo "I" para un diseño con

un factor de cromaticidad $FK(L)$ y una curvatura $CUR(1)$; las aberraciones son del tipo: 1=estérica, 2=coma, 3=astigmatismo, 4=curvatura de Petzval, 5=curvatura de campo, 6=distorsión, 7=cromática axial, 8=cromática lateral.

$CID(a,L,M)$: Valor de la curvatura de la superficie a para un factor de cromaticidad $FK(L)$ y un incremento $(M-3)*DELCl$.

$NDIA$: Número de superficie al que corresponde el diafragma de abertura.

$HDIA$: Altura del diafragma de abertura medida a partir del eje óptico.

DFF : Distancia focal posterior.

DFA : Distancia focal anterior.

$F1$: Distancia focal principal.

$F2$: Distancia focal secundaria.

TPE : Distancia de la primera superficie del sistema a la pupila de entrada.

TPS : Distancia de la última superficie del sistema a la pupila de salida.

HPE : Altura de la pupila de entrada medida a partir del eje óptico.

HPS : Altura de la pupila de salida medida a partir del eje óptico.

DGA : Diferencia entre las invariantes de Lagrange de la primera y la última superficies.

$VH1$: Distancia entre la primera superficie y el primer punto principal.

VH2: Distancia entre la última superficie y el segundo punto principal.

NOD1: Distancia entre la primera superficie y el primer punto nodal.

NOD2: Distancia entre la última superficie y el segundo punto nodal.

B1.2.-LISTA DE SUBRUTINAS

 SUBRUTINA
 NUMERO:

FUNCIONES:

0260

Captura los datos de entrada del sistema; se tienen dos casos: cuando son lentes delgadas y cuando no lo son. En el primer caso se hace referencia a la subrutina de entrada de datos para lentes delgadas.

Realiza el trazo de rayos en la región paraxial mediante el uso del método matricial, calculando los puntos cardinales del sistema así como las pupilas de entrada y de salida del sistema óptico evaluado.

Para esto último se utilizan las subrutinas 4820 (genera la matriz característica del sistema óptico), 3200 (localiza las P.E. y P.S.) y 7510 (trazo de rayos).

0710

Realiza el trazo de rayos a través del sistema mediante el método matricial (subrutina 7510).

1010

Calcula las aberraciones con la teoría de tercer orden.

1380

Correcciones a los datos de entrada: se compone de las subrutinas 1730 (curvaturas), 1900 (índices de refracción), 2020 (separación entre superficies), 2130 (cancelación de superficies) y 1510 (regresos al programa principal).

4040

Impresiones de los datos y resultados.

2260

Realiza el cálculo de opletos acromáticos cementados en las vecindades de mínimas aberraciones esférica y coma (ver capítulo IV).

5210

Grafica el diagrama ye-ye barra del sistema óptico.


```

10 REM CESAR ALBERTO NUNIEZ LOPEZ
20 REM PROGRAMA DE TESIS DE LICENCIATURA
30 REM ASESOR: M.C. RICARDO FLOREZ HDZ. C . I . O . A.C.
40 DIM A(2,2),B(2,2),C(2,2),D(20),R(20),RA$(20),RN(20),TRAZ(2,2)
50 DIM REF(2,2),CUR(20),Y(2,20),ALFA(2,20),RR(2,1),CI(3),SAG(3)
60 DIM PHI(2),ABBE(20),ABR(8,5,5),FK(6),CIO(3,5,5),CABI(8,5),AA(4,5)
70 DIM YY(2),XX(4),BB(4),XT(8,10),YT(8,10),SIGNO(5),CERO$(8),NUMPU(25)
80 DIM XCUR(20),XRN(20),XD(20),CD1(2,2),FT(2,2),P(5),PPO(20),OME(2,20)
90 CLS:PRINT :PRINT :PRINT :PRINT :PRINT :PRINT
100 SCREEN 0
110 PRINT TAB(29);"PROGRAMA PRINCIPAL:":PRINT :PRINT :PRINT :PRINT
120 PRINT TAB(26);"1.- CARGA DE DATOS"
130 PRINT TAB(26);"    Y TRAZADO DE RAYOS"
140 PRINT TAB(26);"2.- TRAZO DE RAYOS"
150 PRINT TAB(26);"3.- CALCULO DE ABERRACIONES"
160 PRINT TAB(26);"4.- CORRECCION DE DATOS"
170 PRINT TAB(26);"5.- IMPRESIONES"
180 PRINT TAB(26);"6.- CALCULO DE DOBLETES ACROMATICOS EN"
190 PRINT TAB(26);"    VECINDADES DE MINIMAS ABERRACIONES"
200 PRINT TAB(26);"7.- DIAGRAMA y-y barra"
210 PRINT TAB(26);"8.- SALIDA DEL SISTEMA"
220 PRINT :PRINT
230 INPUT "                OPCION DESEADA ====>";DES
240 ON DES GOSUB 260,710,1010,1380,4040,2260,5210,8570
250 GOTO 90
260 CLS :PRINT :PRINT :PRINT :PRINT :PRINT :PRINT
270 PRINT TAB(22);" E N T R A D A   D E   D A T O S":PRINT :PRINT :PRINT
280 FLAG1=1:LOCATE 9,20:INPUT "EL SISTEMA SON LENTES DELGADAS (S/N)";DES$
290 IF DES$="S" THEN GOSUB 3380
300 IF LENTE$="ON" THEN GOTO 720
310 PRINT TAB(18);"CUANTAS SUPERFICIES FORMAN EL SISTEMA";:INPUT S
320 FOR I=0 TO S
330   PRINT TAB(18);"CUAL ES EL INDICE DE REFRACCION DEL MEDIO";I;
340   INPUT RN(I)
350 NEXT I
360 PRINT TAB(18);"PROPORCIONA LOS RADIOS DE CURVATURA (S/N)";:INPUT POP$
370 IF POP$="N" GOTO 500
380 FOR I=1 TO S
390 PRINT TAB(18);"EL RADIO DE CURVATURA DE LA SUP.";I;" ES INFINITO (S/N)";
400   INPUT POP$
410   IF POP$="S" GOTO 460
420   PRINT TAB(18);"PROPORCIONE EL RADIO DE CURVATURA DE LA SUP.";I;
430   INPUT R(I)
440   CUR(I)=1/R(I)
450   GOTO 480
460   CUR(I)=0
470   RA$(I)="SI"
480 NEXT I
490 GOTO 580
500 FOR I=1 TO S
510 PRINT TAB(18);"PROPORCIONE LA CURVATURA DE LA SUP.";I;
520 INPUT CUR(I)
530 IF CUR(I)=0 GOTO 560
540 R(I)=1/CUR(I)
550 GOTO 570

```

```

560 RA$(I)="SI"
570 NEXT I
580 CLS:LOCATE 10,17 : PRINT "LA DISTANCIA PLANO OBJETO-PRIMERA SUPERFICIE "
590 LOCATE 11,27 :PRINT "SE PREGUNTARA DESPUES"
600 LOCATE 13,1
610 FOR I=1 TO S-1
620 PRINT TAB(18);"CUAL ES LA SEPARACION ENTRE LA SUP.":I;" Y LA":I+1;
630 INPUT D(I)
640 NEXT I
650 CLS:LOCATE 10,20:INPUT "DESEA CORREGIR ALGUN DATO (S/N)";DES#
660 IF DES#="S" THEN GOSUB 1380
670 CLS:LOCATE 9,20: PRINT"DAME EL NUMERO DE SUPERFICIE QUE CORRESPONDA"
680 LOCATE 10,24:PRINT"AL DIAFRAGMA DE ABERTURA:";:INPUT NDIA
690 LOCATE 12,25:INPUT "DAME LA ALTURA DEL D.A.";HDIA
700 GOSUB 3200
710 IF FLAG1 <> 1 THEN GOTO 260
720 TT2=2:GOSUB 4820
730 CLS:LOCATE 5,1:PRINT TAB(25);"T R A Z O D E R A Y O S"
740 LOCATE 9,10 :PRINT "DISTANCIA PLANO OBJETO-1era. SUP. ES INFINITO(S/N)";
750 INPUT DES#: IF DES#="N" THEN GOTO 790
760 D(S)=DFP : D(0)=0
770 ALFA(1,0)=0: Y(1,0)=HPE: ALFA(2,0)=ATN(HPE/F1):Y(2,0)=0
780 GOTO 830
790 LOCATE 11,15:INPUT "DISTANCIA PLANO OBJETO-1era. SUPERFICIE:";D(0)
800 LOCATE 13,26: INPUT "ALTURA DEL OBJETO:";HBO
810 D(S)=-((RN(S)*(C(1,1)*D(0)/RN(0)+C(1,2)))/(C(2,1)*D(0)/RN(0)+C(2,2)))
820 ALFA(1,0)=ATN(HPE/(D(0)-TPE)):Y(1,0)=0:ALFA(2,0)=-ATN(HBO/(D(0)-TPE)):Y(2,0)=0
830 LOCATE 13,15:PRINT "DISTANCIA ULTIMA SUP.-PLANO IMAGEN:";D(S)
840 LOCATE 16,15:PRINT "PARA EL TRAZO DE RAYOS, Y1 SE REFIERE AL RAYO MARGINAL"
850 PRINT TAB(28);"E Y2 AL RAYO PRINCIPAL";LOCATE 20,25:INPUT "OPRIMA <RET> PA"
860 CLS:LOCATE 3,15: PRINT "DESEA TRAZAR DOS RAYOS DIFERENTES A LOS"
870 LOCATE 4,18: INPUT "RAYOS MARGINAL Y PRINCIPAL (S/N)";DES#
880 IF DES#="N" THEN GOTO 960
890 FOR I=1 TO 2
900 CLS:LOCATE 6,1
910 PRINT TAB(25);"ALTURA DEL RAYO Y";I;:INPUT Y(I,0)
920 PRINT TAB(25);"ANGULO DEL RAYO Y";I;:INPUT ALFA(I,0)
930 LOCATE 10,25 :INPUT "ESTAS SEGURO (S/N)";DES#
940 IF DES#="N" GOTO 900
950 NEXT I
960 GOSUB 7510
970 PI=D(S):LOCATE 16,18 :INPUT "DESEA OBSERVAR LOS RESULTADOS (S/N)";DES#
980 IF DES#="N" GOTO 90
990 GOSUB 4130:GOSUB 4640
1000 GOTO 90
1010 CLS:PRINT :PRINT :PRINT :PRINT :PRINT TAB(24);"A B E R R A C I O N E S"
1020 ESF=0:COMA=0:AST=0:PETZ=0:DIST=0:CDCAM=0:CRMAX=0:CRMAL=0
1030 IF FLAG3 = 1 GOTO 1140
1040 PRINT :PRINT :PRINT
1050 FOR I=0 TO S
1060 CLS: LOCATE 10,1
1070 PRINT TAB(20);"NUMERO DE ABBE DEL MEDIO";I;
1080 INPUT ABBE(I)
1090 LOCATE 12,25:INPUT "ESTAS SEGURO (S/N)";DES#
1100 IF DES#="N" THEN GOTO 1060

```

```

1110 NEXT I
1120 EFE1=F2/(2*HPE): EFE2=F2/(2*HPE*.707)
1130 FLAG=1
1140 FOR K=1 TO 5
1150   GAMA=(Y(1,K)*ALFA(2,K)-Y(2,K)*ALFA(1,K))*RN(K)
1160   FOR J=1 TO 2
1170     PHI(J)=ALFA(J,K-1)+CUR(K)*Y(J,K)
1180   NEXT J
1190   ESF1=RN(K-1)*(RN(K-1)-RN(K))*Y(1,K)*(PHI(1)^2)*(PHI(1)+ALFA(1,K))/(RN(K-1)+ALFA(1,K))
1200   ESF=ESF+ESF1
1210   Q=PHI(2)/PHI(1)
1220   COMA1=Q*ESF1
1230   COMA=COMA+COMA1
1240   AST1=Q*COMA1
1250   AST=AST+AST1
1260   POT=(-RN(K-1)+RN(K))*CUR(K)
1270   PETZ1=.5*(GAMA^2)/(RN(K-1)*RN(K))*(-POT)
1280   PETZ=PETZ+PETZ1
1290   DIST1=Q*(Q^2)*ESF1+PETZ1
1300   DIST=DIST+DIST1
1310   CDCAM1=3*AST1+PETZ1:CDCAM=CDCAM+CDCAM1
1320   CRMAX1=((RN(K-1)-1)/(RN(K-1)*ABBE(K-1))-(RN(K)-1)/(RN(K)*ABBE(K)))
1330   CRMAX1=CRMAX1*RN(K-1)*Y(1,K)*PHI(1)
1340   CRMAX=CRMAX+CRMAX1
1350   CRMAL=CRMAL+Q*CRMAX1
1360 NEXT K
1370 RETURN
1380 CLS:PRINT:PRINT:PRINT
1390 PRINT TAB(27);"CORRECCIONES":PRINT:PRINT:PRINT:PRINT
1400 PRINT TAB(24);"1.- RADIOS DE CURVATURA"
1410 PRINT TAB(24);"2.- CURVATURAS"
1420 PRINT TAB(24);"3.- INDICES DE REFRACCION"
1430 PRINT TAB(24);"4.- SEPARACION ENTRE SUPERFICIES"
1440 PRINT TAB(24);"5.- CANCELACION DE SUPERFICIES"
1450 PRINT TAB(24);"6.- REGRESO AL PROGRAMA PRINCIPAL"
1460 PRINT:PRINT:PRINT:PRINT
1470 INPUT "OPCION DESEADA ==>":DES
1480 ON DES GOSUB 1530,1730,1900,2020,2130,1510
1490 IF FY#="YA" THEN RETURN
1500 GOTO 1380
1510 FY#="YA"
1520 RETURN
1530 CLS:PRINT:PRINT:PRINT
1540 LOCATE 6,17:INPUT "DESEA VER LOS PARAMETROS QUE HA DADO (S/N)":DES#
1550 IF DES#="N" THEN GOTO 1580
1560 ZETA=1:GOSUB 4130:PRINT:LOCATE 24,26:INPUT "OPRIMA <RET> PARA CONTINUAR"
1570 CLS:LOCATE 10,20:PRINT "CORRECCION DE RADIOS DE CURVATURA"
1580 ZETA=0:LOCATE 13,25:INPUT "NUMERO DE SUPERFICIE":I
1590 PRINT:PRINT:PRINT
1600 PRINT TAB(22);"EL NUEVO VALOR ES INFINITO (S/N)":INPUT DES#
1610 IF DES#="S" GOTO 1660
1620 PRINT:PRINT:PRINT TAB(22);"PROPORCIONE EL NUEVO VALOR":
1630 INPUT R(I)
1640 CUR(I)=1/R(I)
1650 GOTO 1680

```

```

1660 RA$(I)="SI"
1670 CUR(I)=0
1680 CLS:PRINT :PRINT :PRINT :PRINT :PRINT :PRINT :PRINT :PRINT :PRINT :PRINT :PRINT
1690 PRINT TAB(16);"DESEA CORREGIR OTRO RADIO DE CURVATURA (S/N)";
1700 INPUT DES$
1710 IF DES$="S" GOTO 1530
1720 RETURN
1730 CLS:PRINT :PRINT :PRINT :PRINT
1740 LOCATE 6,17 :INPUT "DESEA VER LOS PARAMETROS QUE HA DADO (S/N)";DES$
1750 IF DES$="N" THEN GOTO 1780
1760 ZETA=1:GOSUB 4130:LOCATE 24,26 :INPUT "OPRIMA <RET> PARA CONTINUAR";RET
1770 CLS:LOCATE 10,27:PRINT "CORRECCION DE CURVATURA"
1780 ZETA=0:LOCATE 13,28:INPUT "NUMERO DE SUPERFICIE";I
1790 PRINT :PRINT
1800 PRINT TAB(19);"PROPORCIONE EL NUEVO VALOR DE CURVATURA";
1810 INPUT CUR(I)
1820 IF CUR(I)=0 GOTO 1850
1830 R(I)=1/CUR(I)
1840 GOTO 1860
1850 RA$(I)="SI"
1860 CLS:LOCATE 7,1
1870 PRINT TAB(20);"DESEA CORREGIR OTRA CURVATURA (S/N)";:INPUT DES$
1880 IF DES$="S" GOTO 1730
1890 RETURN
1900 CLS:PRINT :PRINT :PRINT :PRINT
1910 LOCATE 6,17 :INPUT "DESEA VER LOS PARAMETROS QUE HA DADO (S/N)";DES$
1920 IF DES$="N" THEN GOTO 1950
1930 ZETA=1:GOSUB 4130: LOCATE 24,26 :INPUT "OPRIMA <RET> PARA CONTINUAR";RET
1940 CLS:LOCATE 10,23:PRINT "CORRECCION DE INDICE DE REFRACCION"
1950 ZETA=0:LOCATE 13,32 :INPUT "NUMERO DE MEDIO";I
1960 LOCATE 16,25:PRINT "DE EL NUEVO INDICE DE REFRACCION";
1970 INPUT RN(I):CLS:PRINT :PRINT :PRINT:PRINT :PRINT :PRINT :PRINT
1980 PRINT TAB(20);"DESEA CORREGIR OTRO IND. DE REF. (S/N)";
1990 INPUT DES$
2000 IF DES$="S" GOTO 1900
2010 RETURN
2020 CLS:PRINT :PRINT :PRINT :PRINT
2030 LOCATE 6,17 :INPUT "DESEA VER LOS PARAMETROS QUE HA DADO (S/N)";DES$
2040 IF DES$="N" THEN GOTO 2070
2050 ZETA=1:GOSUB 4130:LOCATE 24,26 :INPUT "OPRIMA <RET> PARA CONTINUAR";RET
2060 CLS:LOCATE 10,20:PRINT "CORRECCION DE SEPARACION ENTRE SUPERFICIES"
2070 ZETA=0:LOCATE 13,22 :INPUT "ENTRE QUE SUPERFICIES (DE LA INICIAL)";I
2080 LOCATE 16,24:PRINT"DE EL NUEVO VALOR DE SEPARACION";:INPUT D(I)
2090 CLS:PRINT :PRINT :PRINT :PRINT :PRINT :PRINT :PRINT
2100 PRINT TAB(22);"DESEA CORREGIR OTRA SEPARACION (S/N)";:INPUT DES$
2110 IF DES$="S" GOTO 2020
2120 RETURN
2130 CLS:PRINT :PRINT :PRINT :PRINT
2140 PRINT TAB(24);"CANCELACION DE SUPERFICIES":PRINT :PRINT :PRINT :PRINT
2150 PRINT TAB(22);"NUMERO DE SUPERFICIE A CANCELAR";:INPUT I
2160 S=S-1
2170 RN(I)=RN(I-1)
2180 RA$(I)="SI"
2190 CUR(I)=0
2200 FLG3=0

```

```

2210 CLS
2220 LOCATE 10,22 :PRINT "DESEA CANCELAR OTRA SUPERFICIE (S/N)":
2230 INPUT DES$
2240 IF DES$="S" GOTO 2130
2250 RETURN
2260 CLS:PRINT :PRINT :PRINT
2270 PRINT TAB(18):"CALCULO DE DOBLETES ACROMATICOS EN LAS VECINDADES"
2280 PRINT TAB(18):"      DE MINIMAS ABERRACIONES ESFERICA Y COMA"
2290 PRINT :PRINT :PRINT :RN(0)=1:RN(3)=1:ABBE(0)=1000000!:ABBE(3)=1000000!
2300 PRINT TAB(22):"PROPORCIONE LA POTENCIA DESEADA":INPUT PHIO:PRINT
2310 FOCO=1/PHIO
2320 PRINT TAB(18):"INDICE DE REFRACCION DE LA PRIMERALENTE":INPUT RN(1)
2330 PRINT TAB(21):"NUMERO DE ABBE DE LA PRIMERALENTE":INPUT ABBE(1):PRIN
2340 PRINT TAB(18):"INDICE DE REFRACCION DE LA SEGUNDALENTE":INPUT RN(2)
2350 PRINT TAB(21):"NUMERO DE ABBE DE LA SEGUNDALENTE":INPUT ABBE(2):PRIN
2360 PRINT TAB(30):"GROSOR MINIMO":INPUT ZMIN
2370 PRINT TAB(23):"ALTURA PERMITIDA DEL DOBLETE":INPUT YY:
2380 PRINT TAB(19):"VALOR CENTRAL DEL FACTOR DE CROMATICIDAD":INPUT FK(3)
2390 PRINT TAB(19):"INCREMENTO DEL FACTOR DE CROMATICIDAD":INPUT DELK
2400 PRINT TAB(19):"FACTOR DE INCREMENTO DE LA CURVATURA":INPUT DELC1
2410 PRINT :PRINT TAB(30):"VALOR DE APROXIMACION":INPUT EPSI
2420 CLS: LOCATE 20,34:PRINT "(CALCULANDO)"
2430 FK(1)=FK(3)-2*DELK
2440 LL=0
2450 LL=LL+1
2460 PIA=PHIO/(1-FK(LL)*ABBE(2)/ABBE(1))
2470 PIB=PIA*FK(LL)*(-ABBE(2)/ABBE(1))
2480 EQN=(RN(1)/ABS(PIA)+RN(2)/ABS(PIB))/(1/ABS(PIA)+1/ABS(PIB))
2490 ALFA1=PIA/(RN(1)-1)
2500 ALFA2=FK(LL)*ABBE(2)*PIA/(ABBE(1)*(RN(2)-1))
2510 KE=EQN*(2*EQN+1)/(2*EQN+4)
2520 KC=EQN^2/(EQN+1)
2530 C13=(ALFA1-ALFA2)*(KC+KE)*.5
2540 CUR(1)=C13-2*DELC1
2550 M=0
2560 M=M+1
2570 CUR(2)=CUR(1)-ALFA1
2580 CUR(3)=CUR(2)+ALFA2
2590 FOR I=1 TO 3
2600 IF CUR(I)=0 THEN GOTO 2640
2610 G=1-(YY*CUR(I))^2
2620 SAG(I)=(1-G^(1/2))/CUR(I)
2630 GOTO 2650
2640 SAG(I)=0
2650 NEXT I
2660 FOR I=1 TO 2
2670 DSAG=SAG(I+1)-SAG(I)
2680 IF DSAG < 0 GOTO 2710
2690 D(I)=ZMIN
2700 GOTO 2720
2710 D(I)=ZMIN-DSAG
2720 NEXT I
2730 S=3:CVE=1:FLAG1=1:FLAG3=1:NDIA=1
2740 Y(2,0)=0 : ALFA(1,0)=0
2750 Y(1,0)=YY*.707

```



```

2760 GOSUB 3200:TT2=2:GOSUB 4820:ALFA(2,0)=ATN(Y(1,0)/F2)
2770 GOSUB 7510:GOSUB 1020
2780 EFE=(F2/(2*Y(1,0)))
2790 ABR(1,LL,M)=ESF*EFE
2800 ABR(2,LL,M)=COMA*EFE
2810 ABR(3,LL,M)=AST*EFE
2820 ABR(4,LL,M)=PETZ*EFE
2830 ABR(5,LL,M)=CDCAM*EFE
2840 ABR(6,LL,M)=DIST*EFE
2850 ABR(7,LL,M)=CRMAL*EFE
2860 ABR(8,LL,M)=CRMAL*EFE
2870 IF ZORRO#="ON" THEN RETURN
2880 CIO(1,LL,M)=CUR(1)
2890 CIO(2,LL,M)=CUR(2)
2900 CIO(3,LL,M)=CUR(3)
2910 CUR(1)=CUR(1)+DELCL
2920 IF M <= 4 THEN GOTO 2560
2930 FK(LL+1)=FK(LL)+DELK
2940 IF LL <= 4 THEN GOTO 2450
2950 FOR I=1 TO 8
2960 NUMPU(I)=0
2970 FOR J=1 TO 5
2980 FOR K=1 TO 4
2990 SIGNO(K)=SGN(ABR(I,J,K))
3000 SIGNO(K+1)=SGN(ABR(I,J,K+1))
3010 IF SIGNO(K)=SIGNO(K+1) GOTO 3040
3020 TIPO#="CURVA":CERO#(I)="ON"
3030 GOSUB 3550
3040 NEXT K
3050 NEXT J
3060 FOR J=1 TO 5
3070 FOR K=1 TO 4
3080 SIGNO(K)=SGN(ABR(I,K,J))
3090 SIGNO(K+1)=SGN(ABR(I,K+1,J))
3100 IF SIGNO(K)=SIGNO(K+1) GOTO 3130
3110 TIPO#="CROMA":CERO#(I)="ON"
3120 GOSUB 3550
3130 NEXT K
3140 NEXT J
3150 ETA=0
3160 NEXT I
3170 GOSUB 7880
3180 INPUT WW
3190 RETURN
3200 REM SUBROUTINA PARA LOCALIZACION DE LAS P.E Y P.S.
3210 TT2=2:JKOM=1
3220 GOSUB 4820:FT(1,1)=C(1,1):FT(1,2)=C(1,2):FT(2,1)=C(2,1):FT(2,2)=C(2,2)
3230 JKOM=0:K=NDIA+1:GOSUB 3490:TT2=NDIA+1
3240 FOR I=1 TO 2
3250 FOR J=1 TO 2
3260 C(I,J)=REF(I,J)
3270 NEXT J
3280 NEXT I:GOSUB 4920
3290 TPE=(RN(0)*(CD1(1,1)*D(NDIA-1)/RN(NDIA-1)-CD1(1,2)))/(CD1(2,1)*D(NDIA-1)/R
3300 TPS=- (RN(S)*(C(1,1)*D(NDIA)/RN(NDIA)+C(1,2)))/(C(2,1)*D(NDIA)/RN(NDIA)+C(2

```

```

3310 HPE=HDIA*(CD1(1,1)-TPE*CD1(2,1)/RN(0)):HPS=HDIA*(C(1,1)+TPS*C(2,1)/RN(S))
3320 C(1,1)=FT(1,1):C(1,2)=FT(1,2):C(2,1)=FT(2,1):C(2,2)=FT(2,2)
3330 F1=-RN(0)/C(2,1):F2=-RN(S)/C(2,1)
3340 NOD1=(C(2,2)-RN(S)/RN(0))*F1:NOD2=(C(1,1)-RN(0)/RN(S))*F2
3350 DFA=C(2,2)*F1:DFP=C(1,1)*F2
3360 VH1=(C(2,2)-1)*F1:VH2=(C(1,1)-1)*F2
3370 RETURN
3380 REM SUBROUTINA DE CARGA DE DATOS PARA LENTES DELGADAS
3390 CLS:LOCATE 10,20: INPUT "CUANTAS LENTES FORMAN EL SISTEMA:";S
3400 FOR I=1 TO S-1
3410 PRINT TAB(15);"CUAL ES LA SEPARACION ENTRE LALENTE";I;"Y LA";I+1;
3420 INPUT D(I)
3430 NEXT I
3440 FOR I=1 TO S
3450 PRINT TAB(15);"CUAL ES LA POTENCIA DE LALENTE";I;:INPUT PPO(I)
3460 NEXT I
3470 LENTE$="ON"
3480 RETURN
3490 REM SUBROUTINA DE MATRIZ DE REFRACCION
3500 IF LENTE$="ON" THEN REF(2,1)=-PPO(K) ELSE REF(2,1)=(RN(K-1)-RN(K))*CUR(K)
3510 REF(1,1)=1
3520 REF(1,2)=0
3530 REF(2,2)=1
3540 RETURN
3550 REM SUBROUTINA DE BUSQUEDA DE LAS ECUACIONES DE ABERRACION
3560 IF TIPO$="CROMA" GOTO 3640
3570 FOR L=1 TO 4
3580 AA(L,5)=ABR(I,J,L)
3590 FOR M=1 TO 4
3600 AA(L,M)=(CIO(1,J,L))^(4-M)
3610 NEXT M
3620 NEXT L
3630 GOTO 3700
3640 FOR L=1 TO 4
3650 AA(L,5)=ABR(I,L,J)
3660 FOR M=1 TO 4
3670 AA(L,M)=(FK(L))^(4-M)
3680 NEXT M
3690 NEXT L
3700 FAC=1
3710 FOR L=1 TO 4
3720 FOR M=1 TO 4
3730 IF L=M GOTO 3770
3740 FOR N=L+1 TO 5
3750 AA(M,N)=(AA(L,L)*AA(M,N)-AA(L,N)*AA(M,L))/FAC
3760 NEXT N
3770 NEXT M
3780 FAC=AA(L,L)
3790 NEXT L
3800 FOR L=1 TO 4
3810 BB(L)=AA(L,5)/AA(4,4)
3820 NEXT L
3830 IF TIPO$="CROMA" GOTO 3860
3840 X1=CIO(1,J,K): X2=CIO(1,J,K+1)
3850 GOTO 3870

```

```

3860 X1=FK(K) : X2=FK(K+1)
3870 CUENTA=0
3880 DEF FNABC(X)=BB(4)+BB(3)*X+BB(2)*(X^2)+BB(1)*(X^3)
3890 INCRE = ABS(X1-X2)/2
3900 CUENTA=CUENTA+1
3910 IF X1 < X2 THEN X0=X1+INCRE ELSE X0=X2+INCRE
3920 IF SGN(FNABC(X0)) <> SGN(FNABC(X2)) THEN X1=X0 ELSE X2=X0
3930 IF ABS(FNABC(X0)) < EPSI THEN GOTO 3960
3940 IF CUENTA > 100 THEN GOTO 3960
3950 GOTO 3890
3960 IF CUENTA > 100 THEN PRINT "CONVERGENCIA MUY LENTA"
3970 IF TIPO#="CROMA" GOTO 4000
3980 XT(I,ETA)=X0-CIO(1,J,3):YT(I,ETA)=FK(J)
3990 GOTO 4010
4000 XT(I,ETA)=CIO(1,K,J)-CIO(1,K,3):YT(I,ETA)=X0
4010 ETA=ETA+1
4020 NUMPU(I)=NUMPU(I)+1
4030 RETURN
4040 CLS:LOCATE 10,30 :PRINT "I M P R E S I O N E S"
4050 LOCATE 13,27 :PRINT "1.- PARAMETROS DEL SISTEMA"
4060 LOCATE 14,27 :PRINT "2.- ABERRACIONES"
4070 LOCATE 15,27 :PRINT "3.- TRAZO DE RAYOS"
4080 LOCATE 16,27:PRINT "4.- REGRESO A PROGRAMA PRINCIPAL"
4090 LOCATE 22,26 :INPUT "OPCION DESEADA ==>";DES
4100 ON DES GOSUB 4130,4490,4640,4120
4110 GOTO 4040
4120 GOTO 90
4130 CLS:LOCATE 4,1
4140 PRINT TAB(25);" I M P R E S I O N E S":PRINT :PRINT
4150 PRINT "*****"
4160 PRINT"      SUPERFICIE      CURVATURA      DISTANCIA ENTRE      INDICE DE
4170 PRINT"      [I]      [I]      SUPERFICIES [I,I+1] REFRACCIO
4180 PRINT "*****"
4190 PRINT :PRINT TAB(57);USING "##.#####";RN(0)
4200 FOR I=1 TO S-1
4210     PRINT USING "#####.#####";I;CUR(I)
4220     PRINT TAB(30);USING "#####.#####";D(I);RN(I)
4230 NEXT I
4240 PRINT USING "#####.#####";S;CUR(S)
4250 PRINT TAB(57);USING "##.#####";RN(S)
4260 PRINT "*****"
4270 IF ZETA=1 THEN RETURN
4280 LOCATE 24,26:INPUT "OPRIMA <RET> PARA CONTINUAR";RET:CLS
4290 PRINT :PRINT "ESPACIO OBJETO:";PRINT
4300 PRINT TAB(10);"DISTANCIA FOCAL PRINCIPAL:";F1
4310 PRINT
4320 PRINT TAB(10);"DISTANCIA FOCAL ANTERIOR:";DFA
4330 PRINT:PRINT "ESPACIO IMAGEN:";PRINT
4340 PRINT TAB(10);"DISTANCIA FOCAL SECUNDARIA:";F2
4350 PRINT:PRINT TAB(10);"DISTANCIA FOCAL POSTERIOR:";
4360 LOCATE 24,26:INPUT "OPRIMA <RET> PARA CONTINUAR";RET:CLS
4370 PRINT "PUNTOS PRINCIPALES Y PUNTOS NODALES:";PRINT
4380 PRINT TAB(10);"DISTANCIA ENTRE EL VERTICE DE LA PRIMER"
4390 PRINT TAB(10);"SUPERFICIE Y EL PRIMER PUNTO PRINCIPAL:";VH1
4400 PRINT

```

```

10 PRINT TAB(10);"DISTANCIA ENTRE EL VERTICE DE LA ULTIMA"
20 PRINT TAB(10);"SUPERFICIE Y EL SEGUNDO PUNTO PRINCIPAL: ";VH2
30 PRINT:PRINT TAB(10);"PRIMER PUNTO NODAL: ";NOD1:PRINT :PRINT TAB(10);"SEGUNDO
SALIDA: ":PRINT
40 PRINT TAB(10);"PUPILA DE ENTRADA: ";TPE:PRINT
50 PRINT TAB(10);"PUPILA DE SALIDA: ";TPS:PRINT
60 PRINT TAB(10);"ALTURA DE LA P.E.:";HPE:PRINT :PRINT TAB(10);"ALTURA DE LA P.S
70 PRINT :LOCATE 24,26 :INPUT "OPRIMA <RET> PARA CONTINUAR";RE
80 RETURN
90 CLS:LOCATE 10,1
00 PRINT :PRINT :PRINT TAB(25);"*****ABERRACIONES*****"
10 LOCATE 15,20: INPUT "DESEA NUMERO EFE CORREGIDO (S/N)";DES#
20 IF DES#="S" THEN TL=EFE2 ELSE TL=EFE1
30 PRINT :PRINT
40 PRINT TAB(17);"ESFERICA: ";ESF*TL
50 PRINT TAB(17);"COMA: ";COMA*TL
60 PRINT TAB(17);"DISTORSION: ";DIST*TL
70 PRINT TAB(17);"CURVATURA DE PETZVAL: ";PETZ*TL
80 PRINT TAB(17);"CURVATURA DE CAMPO: ";CDCAM*TL
90 PRINT TAB(17);"ASTIGMATISMO: ";AST*TL
00 PRINT TAB(17);"CROMATICA AXIAL: ";CRMAX*TL
10 PRINT TAB(17);"CROMATICA LATERAL: ";CRMAL*TL
20 PRINT :PRINT :PRINT :LOCATE 24,26:INPUT "OPRIMA <RET> PARA CONTINUAR";RET
30 RETURN
40 CLS:LOCATE 10,1
50 PRINT " *****RESULTADOS DEL TRAZO DE RAYOS EN LA REGION PARAXIAL*****
60 PRINT "=====
70 PRINT " SUPERFICIE ALTURA DEL RAYO ANGULO DE ALTURA DEL RAYO ANGU
80 PRINT " [I] MARGINAL SALIDA PRINCIPAL SA
90 PRINT "=====
00 FOR K=0 TO S+1
10 PRINT USING "#####.#####";K;Y(1,K);ALFA(1,K)*RN(K);Y(2,K);ALFA(2,K)*RN
20 NEXT K
30 PRINT "=====
40 PRINT :PRINT :PRINT :LOCATE 24,26:INPUT "OPRIMA <RET> PARA CONTINUAR";RET
50 RETURN
60 REM SUBROUTINA DE MATRIZ DE TRANSFERENCIA
70 TRAZ(1,1)=1
80 TRAZ(2,1)=0
90 IF LENTE#="ON" THEN TRAZ(1,2)=D(K) ELSE TRAZ(1,2)=D(K)/RN(K)
00 TRAZ(2,2)=1
10 RETURN
20 K=1
30 GOSUB 3490
40 GOSUB 4760
50 CD1(1,1)=1:CD1(1,2)=0:CD1(2,1)=0:CD1(2,2)=1
60 FOR I=1 TO 2
70 FOR J=1 TO 2
80 A(I,J)=TRAZ(I,J)
90 B(I,J)=REF(I,J)
00 NEXT J
10 NEXT I
20 FOR K=TT2 TO S
30 IF JKOM=0 THEN GOTO 5060
40 LIM=2
50 GOSUB 7410

```

```

960 GOSUB 3490
970 FOR I=1 TO 2
980   FOR J=1 TO 2
990     A(I,J)=REF(I,J)
1000    B(I,J)=C(I,J)
1010   NEXT J
1020 NEXT I
1030 GOSUB 7410
1040 IF ((NDIA-1)=K) AND (IKON<>1) THEN GOSUB 7850
1050 IF K=S GOTO 5150
1060 GOSUB 4760
1070 JKOM=1
1080 FOR I=1 TO 2
1090   FOR J=1 TO 2
1100     A(I,J)=TRAZ(I,J)
1110     B(I,J)=C(I,J)
1120   NEXT J
1130 NEXT I
1140 NEXT K
1150 IF LENTE#="ON" THEN RETURN
1160 F1=-RN(0)/C(2,1):F2=-RN(S)/C(2,1)
1170 DFA=C(1,1)*F1:DFF=C(2,2)*F2
1180 VH1=RN(0)*(C(2,2)-1)/C(2,1) : VH2=RN(S)*(1-C(1,1))/C(2,1)
1190 NOD1=(C(2,2)-RN(S)/RN(0))*F1:NOD2=(C(1,1)-RN(0)/RN(S))*F2
1200 RETURN
1210 REM SUBROUTINA Y-Y BARRA
1220 TOP=0: PI=D(S)
1230 CLS:SCREEN 2:LINE(0,190)-(639,190)
1240 LINE(320,380)-(320,0):LOCATE 1,40:PRINT "y"
1250 LOCATE 13,80:PRINT "y"
1260 LINE(630,194)-(639,194)
1270 FOR I=1 TO 2
1280   YY(I)=ABS(Y(I,0))
1290   FOR K=0 TO S+1
1300     IF ABS(Y(I,K)) > ABS(YY(I)) THEN YY(I)=ABS(Y(I,K))
1310   NEXT K
1320   MAY=CINT(YY(I))
1330   IF MAY>= YY(I) THEN GOTO 5350
1340   YY(I)=MAY+.5:GOTO 5360
1350   YY(I)=MAY
1360 NEXT I
1370 IF D(0) <> 0 THEN GOTO 5410
1380 Y1=.19*(1000-CINT(1000*Y(1,1)/YY(1)))
1390 X1=.32*(CINT(1000*Y(2,1)/YY(2))+1000)
1400 LINE(0,Y1)-(X1,Y1)
1410 FOR K=INI TO S
1420   X1=.32*(CINT(1000*Y(2,K)/YY(2))+1000)
1430   Y1=.19*(1000-CINT(1000*Y(1,K)/YY(1)))
1440   X2=.32*(CINT(1000*Y(2,K+1)/YY(2))+1000)
1450   Y2=.19*(1000-CINT(1000*Y(1,K+1)/YY(1)))
1460   LINE(X1,Y1)-(X2,Y2)
1470   LINE(X2-5,Y2)-(X2+5,Y2)
1480   LINE(X2,Y2-5)-(X2,Y2+5)
1490 NEXT K
1500 IF TOP=1 THEN RETURN

```

```

5510 QW=10
5520 X1=0
5530 LINE(X1,188)-(X1,192)
5540 X1=X1+QW
5550 IF X1>640 GOTO 5570
5560 GOTO 5530
5570 LINE(345,230)-(487,275),2,B:LOCATE 16,45:PRINT "CMS/DIV: ";YY(2);"/32"
5580 LOCATE 17,45:PRINT "CMS/DIV: ";YY(1);"/19":LOCATE 17,64:PRINT "EJE y"
5590 LOCATE 16,64:PRINT "EJE y barra"
5600 LOCATE 22,45:PRINT "PLANO IMAGEN: ";D(S)
5610 IF D(0)=0 THEN GOTO 5630
5620 LOCATE 23,45:PRINT "PLANO OBJETO: ";D(0):GOTO 5640
5630 LOCATE 23,45:PRINT "PLANO OBJETO EN EL INFINITO"
5640 Y1=0
5650 LINE(318,Y1)-(322,Y1)
5660 Y1=Y1+QW
5670 IF Y1>380 GOTO 5690
5680 GOTO 5650
5690 LINE(0,220)-(300,380),2,B:LINE(340,220)-(630,380),2,B
5700 LOCATE 16,5:PRINT " 1.- CURVATURAS"
5710 LOCATE 17,5:PRINT " 2.- IND. DE REFRACCION"
5720 LOCATE 18,5:PRINT " 3.- DISTANCIA ENTRE SUP"
5730 LOCATE 19,6:PRINT "4.- CORRECCIONES":LOCATE 21,6:PRINT "6.- MENU ANTERIOR"
5740 LOCATE 20,6:PRINT "5.- DIAGRAMA OMEGA-OMEGA BARRA"
5750 LOCATE 13,80:PRINT " "
5760 LOCATE 23,20 :INPUT "OPCION: ";OP
5770 LOCATE 13,80:PRINT "y"
5780 GOSUB 6100
5790 ON OP GOSUB 5840,5930,6020,6160,8470,5820
5800 GOSUB 6100
5810 GOTO 5700
5820 GOTO 90
5830 RETURN
5840 LOCATE 16,3:PRINT "SUPERFICIE CURVATURA"
5850 FOR I=1 TO S
5860 PRINT USING"####.#####";I;CUR(I)
5870 IF (I<>8) AND (I<>16) GOTO 5900
5880 INPUT LW
5890 GOSUB 6100
5900 NEXT I
5910 INPUT LW
5920 RETURN
5930 LOCATE 16,6:PRINT "MEDIO IND DE REF"
5940 FOR I=0 TO S
5950 PRINT USING "####.#####";I;RN(I)
5960 IF (I<>8) AND (I<>16) GOTO 5990
5970 INPUT LW
5980 GOSUB 6100
5990 NEXT I
6000 INPUT LW
6010 RETURN
6020 LOCATE 16,4:PRINT " SUPERFICIES DISTANCIA"
6030 FOR I=1 TO S-1
6040 PRINT USING"###.#####";I;I+1:D(I)
6050 IF (I<>8) AND (I<>16) GOTO 6070

```

```

6060   GOSUB 6100
6070 NEXT I
6080 INPUT LW
6090 RETURN
6100 LOCATE 14,2
6110 FOR J=1 TO 10
6120   PRINT "
6130 NEXT J
6140 LOCATE 17,3
6150 RETURN
6160 REM CORRECCIONES "BENDING"
6170 LOCATE 16,5 :PRINT "CORRECCIONES"
6180 LOCATE 18,5: PRINT "1.- CURVATURAS"
6190 LOCATE 19,5:PRINT "2.- DISTANCIAS ENTRE SUP"
6200 LOCATE 20,5:PRINT "3.- INDICES DE REFRACCION"
6210 LOCATE 21,5:PRINT "4.- MENU ANTERIOR"
6220 LOCATE 23,20:INPUT "OPCION:";OP
6230 GOSUB 6100
6240 ON OP GOSUB 6270,6610,7010,6250
6250 GOSUB 6100
6260 GOTO 5700
6270 LOCATE 18,4:INPUT "VER CURVATURAS ACTUALES(S/N)";DES#
6280 GOSUB 6100
6290 IF DES#="S" THEN GOSUB 5840
6300 GOSUB 6100
6310 FOR I=1 TO S
6320   XCUR(I)=CUR(I)
6330 NEXT I
6340 LOCATE 18,3:INPUT "SUPERFICIE:";I
6350 LOCATE 20,3:INPUT "NUEVO VALOR";CUR(I)
6360 LOCATE 22,3:PRINT "(CALCULANDO)"
6370 GOSUB 4820
6380 IF D(0)=0 THEN GOTO 6400
6390 D(S)=-((RN(S)*(C(1,1)*D(0)/RN(0)+C(1,2)))/(C(2,1)*D(0)/RN(0)+C(2,2))):GOTO
6400 D(S)=DFP
6410 ESCA=D(S)/PI
6420 FOR I=1 TO S
6430   CUR(I)=CUR(I)*ESCA
6440 NEXT I
6450 GOSUB 4820:IF D(0)=0 THEN GOTO 6480
6460 D(S)=-((RN(S)*(C(1,1)*D(0)/RN(0)+C(1,2)))/(C(2,1)*D(0)/RN(0)+C(2,2))
6470 GOTO 6490
6480 D(S)=DFP
6490 GOSUB 7510
6500 TOP=1:GOSUB 5270
6510 GOSUB 5840
6520 LOCATE 19,50:PRINT "MODELO A CONSERVAR"
6530 LOCATE 20,48:PRINT "(1.- ACTUAL 2.- ANTERIOR)";:INPUT OP
6540 IF OP=1 THEN GOTO 5210
6550 FOR I=1 TO S
6560   CUR(I)=XCUR(I)
6570 NEXT I
6580 GOSUB 4820
6590 IF D(0)=0 THEN D(S)=DFP ELSE D(S)=-((RN(S)*(C(1,1)*D(0)/RN(0)+C(1,2)))/
6600 GOSUB 7510: GOTO 5210

```

```

6610 REM SUBROUTINA DE CORRECCION DE SEPARACION ENTRE SUPERFICIES
6620 LOCATE 18,4:INPUT "VER SEPARACIONES ACTUALES(S/N)";DES#
6630 GOSUB 6100
6640 IF DES#="S" THEN GOSUB 6020
6650 FOR I=1 TO S-1
6660   XD(I)=D(I)
6670 NEXT I
6680 GOSUB 6100
6690 LOCATE 18,3:INPUT "PRIMERA SUPERFICIE:";I
6700 LOCATE 19,3:INPUT "DISTANCIA A LA SIGUIENTE";D(I)
6710 LOCATE 22,3:PRINT "(CALCULANDO)";GOSUB 4820
6720 IF D(0)=0 THEN GOTO 6750
6730 D(S)=-((RN(S)*(C(1,1)*D(0)/RN(0)+C(1,2)))/(C(2,1)*D(0)/RN(0)+C(2,2)))
6740 GOTO 6760
6750 D(S)=DFP
6760 ESCA=D(S)/PI
6770 FOR I=1 TO S-1
6780   D(I)=D(I)*ESCA
6790 NEXT I
6800 GOSUB 4820
6810 IF D(0)=0 THEN GOTO 6850
6820 D(S)=-((RN(S)*(C(1,1)*D(0)/RN(0)+C(1,2)))/(C(2,1)*D(0)/RN(0)+C(2,2)))
6830 ALFA(1,0)=ATN(HPE/(D(0)-TPE));Y(1,0)=0:ALFA(2,0)=-ATN(HBO/(D(0)-TPE))
6840 GOTO 6870
6850 D(S)=DFP
6860 ALFA(1,0)=0:Y(1,0)=HPE:ALFA(2,0)=ATN(HPE/F1):Y(2,0)=0
6870 GOSUB 7510:TOP=1:GOSUB 5270:GOSUB 6020
6880 LOCATE 19,50:PRINT "MODELO A CONSERVAR"
6890 LOCATE 20,48:PRINT "(1.- ACTUAL 2.- ANTERIOR)";:INPUT OP
6900 IF OP=1 THEN GOTO 5210
6910 FOR I=1 TO S-1
6920   D(I)=XD(I)
6930 NEXT I
6940 GOSUB 4820:IF D(0)=0 THEN GOTO 6970
6950 D(S)=-((RN(S)*(C(1,1)*D(0)/RN(0)+C(1,2)))/(C(2,1)*D(0)/RN(0)+C(2,2)))
6960 ALFA(1,0)=ATN(HPE/(D(0)-TPE));Y(1,0)=0:ALFA(2,0)=-ATN(HBO/(D(0)-TPE))
6970 D(S)=DFP
6980 ALFA(1,0)=0:Y(1,0)=HPE:ALFA(2,0)=ATN(HPE/F1):Y(2,0)=0
6990 GOSUB 7510:GOTO 5210
7000 REM CORRECCION DE INDICES DE REFRACCION (BENDING)
7010 GOSUB 6100
7020 FOR I=1 TO S-1
7030   XD(I)=D(I)
7040 NEXT I
7050 LOCATE 18,4 : INPUT "VER LOS VALORES ACTUALES (S/N)";DES# :GOSUB 6100
7060 IF DES#="S" THEN GOSUB 5930
7070 GOSUB 6100
7080 LOCATE 18,3: INPUT "NUMERO DE MEDIO:";I:XRN(I)=RN(I):NAUX=I
7090 LOCATE 20,3: INPUT "NUEVO VALOR:";RN(I)
7100 LOCATE 22,3: PRINT "(CALCULANDO)"; GOSUB 4820
7110 IF D(0)=0 THEN GOTO 7140
7120 D(S)=-((RN(S)*(C(1,1)*D(0)/RN(0)+C(1,2)))/(C(2,1)*D(0)/RN(0)+C(2,2)))
7130 GOTO 7150
7140 D(S)=DFP
7150 ESCA=D(S)/PI

```



```

0 FOR I=1 TO S-1
0   D(I)=D(I)*ESCA
0 NEXT I
0 GOSUB 3200
0 IF D(0)=0 THEN GOTO 7240
0 D(S)=-((RN(S)*(C(1,1)*D(0)/RN(0)+C(1,2)))/(C(2,1)*D(0)/RN(0)+C(2,2))
0 ALFA(1,0)=ATN(HPE/(D(0)-TPE));Y(1,0)=0;ALFA(2,0)=-ATN(HBO/(D(0)-TPE));Y(2,0)=H
0 GOTO 7260
0 D(S)=DFP
0 ALFA(1,0)=0;Y(1,0)=HPE;ALFA(2,0)=ATN(HPE/F1);Y(2,0)=0
0 GOSUB 7510;TOP=1;GOSUB 5270;GOSUB 6100;GOSUB 5930
0 LOCATE 19,50:PRINT "MODELO A CONSERVAR"
0 LOCATE 20,48:PRINT "(1.- ACTUAL 2.- ANTERIOR)";:INPUT OP
0 IF OP=1 THEN GOTO 5210
0 FOR I=1 TO S-1
0   D(I)=KD(I)
0 NEXT I
0 RN(NAUX)=XRN(NAUX)
0 GOSUB 3200;IF D(0)=0 THEN GOTO 7380
0 D(S)=-((RN(S)*(C(1,1)*D(0)/RN(0)+C(1,2)))/(C(2,1)*D(0)/RN(0)+C(2,2))
0 ALFA(1,0)=ATN(HPE/(D(0)-TPE));Y(1,0)=0;ALFA(2,0)=-ATN(HBO/(D(0)-TPE));Y(2,0)=H
0 GOTO 7400
0 D(S)=DFP
0 ALFA(1,0)=0;Y(1,0)=HPE;ALFA(2,0)=ATN(HPE/F1);Y(2,0)=0
0 GOSUB 7510;GOTO 5210
0 REM SUBROUTINA DE MULTIPLICACION DE MATRICES
0 FOR I=1 TO 2
0   FOR J=1 TO LIM
0     C(I,J)=0
0     FOR L=1 TO 2
0       C(I,J)=C(I,J)+A(I,L)*B(L,J)
0     NEXT L
0   NEXT J
0 NEXT I
0 RETURN
0 FOR RAY=1 TO 2
0   RR(2,1)=RN(0)*ALFA(RAY,0)
0   RR(1,1)=Y(RAY,0)
0   K=0;GOSUB 4760
0   FOR I=1 TO 2
0     FOR J=1 TO 2
0       A(I,J)=TRAZ(I,J)
0     NEXT J
0     B(I,1)=RR(I,1)
0   NEXT I
0   LIM=1
0   GOSUB 7410
0   FOR K=1 TO S
0     GOSUB 3490;GOSUB 4760
0     FOR I=1 TO 2
0       FOR J=1 TO 2
0         A(I,J)=REF(I,J)
0       NEXT J
0       B(I,1)=C(I,1)
0     NEXT I

```

```

GOSUB 7410
Y(RAY,K)=C(1,1):ALFA(RAY,K)=C(2,1)/RN(K)
FOR I=1 TO 2
  FOR J=1 TO 2
    A(I,J)=TRAZ(I,J)
  NEXT J
  B(1,1)=C(I,1)
NEXT I
GOSUB 7410
NEXT K
Y(RAY,S+1)=C(1,1):ALFA(RAY,S+1)=C(2,1)/RN(S)
NEXT RAY
DGA=ABS(RN(1)*(Y(1,1)*ALFA(2,1)-Y(2,1)*ALFA(1,1))-RN(S+1)*(Y(1,S)*ALFA(2,S)-Y(2,S)*ALFA(1,S)))
RETURN
CD1(1,1)=C(2,2):CD1(1,2)=-C(1,2):CD1(2,1)=-C(2,1):CD1(2,2)=C(1,1)
IKON=1
RETURN
REM SUBROUTINA PARA GRAFICA DE CEROS DE ABERRACIONES
CLS:SCREEN 2:LINE(0,100)-(609,100):LINE(320,196)-(320,4)
FOR II=1 TO 8
  IF CERO*(II)<>"ON" THEN GOTO 8150
  FOR JJ=0 TO NUMPU(II)-2
    IF XT(II,JJ) < XT(II,JJ+1) THEN GOTO 8030
    FOR KL=JJ+1 TO 1 STEP -1
      IF XT(II,KL-1) < XT(II,KL) THEN GOTO 8020
      AUX1=XT(II,KL-1)
      AUX2=YT(II,KL-1)
      XT(II,KL-1)=XT(II,KL)
      YT(II,KL-1)=YT(II,KL)
      XT(II,KL)=AUX1
      YT(II,KL)=AUX2
    NEXT KL
  NEXT JJ
  FOR JJ=0 TO NUMPU(II)-2
    X1=.32*(CINT(1000*XT(II,JJ)/(DELK1*2))+1000)
    X2=.32*(CINT(1000*XT(II,JJ+1)/(DELK1*2))+1000)
    Y1=4+48/DELK*(FK(5)-YT(II,JJ))
    Y2=4+48/DELK*(FK(5)-YT(II,JJ+1))
    LINE(X1,Y1)-(X2,Y2)
  NEXT JJ
  IF Y1 > 8 THEN LY=Y1/8 ELSE LY=1
  IF X1 > 8 THEN LX=X1/8 ELSE LX=1
  IF X1 >= 628 THEN LX=LX-2
  LOCATE LY,LX:PRINT "S":II;
NEXT II
QW=10
X1=0
LINE(X1,98)-(X1,102)
X1=X1+QW
IF X1 > 640 THEN GOTO 8220
GOTO 8180
Y1=4
LINE(318,Y1)-(322,Y1)
Y1=Y1+4
IF Y1 > 297 THEN GOTO 8270

```

```

GOTO 8230
LINE(345,115)-(629,196),2,B
LOCATE 17,45:PRINT"PARA ESCOGER UN DISEÑO PROPOR-"
LOCATE 18,45:PRINT "CIONE SU DISTANCIA AL EJE X";:INPUT LAL:ZORRO#="ON"
FK(1)=FK(3)+DELK*LAL/12
DELC1=0
GOSUB 2440:ZORRO#="NADA":CLS
TL=EFE:GOSUB 4530: ZATE=1:GOSUB 4130:ZETA=0: GOSUB 4290
LOCATE 23,20:INPUT "DESEA ESCOGER OTRO DISEÑO (S/N)";DES#
IF DES#="S" THEN GOTO 7880
RETURN
REM SUBROUTINA PARA GRAFICA OMEGA-OMEGA BARRA
FOR I=1 TO 2
  FOR J=0 TO S
    IF OGE#="ON" THEN OME(I,J)=ALFA(I,J)/(Y(1,J)*ALEA(2,J)-Y(2,J)*ALEA(1,J))
    AUXI=Y(I,J)
    Y(I,J)=OME(I,J)
    OME(I,J)=AUXI
  NEXT J
NEXT I
RETURN
REM SUBROUTINA OMEGA-OMEGA BARRA
OGE#="ON"
GOSUB 8370
S=S-1
TOP=1:GOSUB 5230
S=S+1
OGE#="OFF"
GOSUB 8370
LOCATE 20,48:PRINT "DIAGRAMA OMEGA-OMEGA BARRA"
RETURN
END

```

