

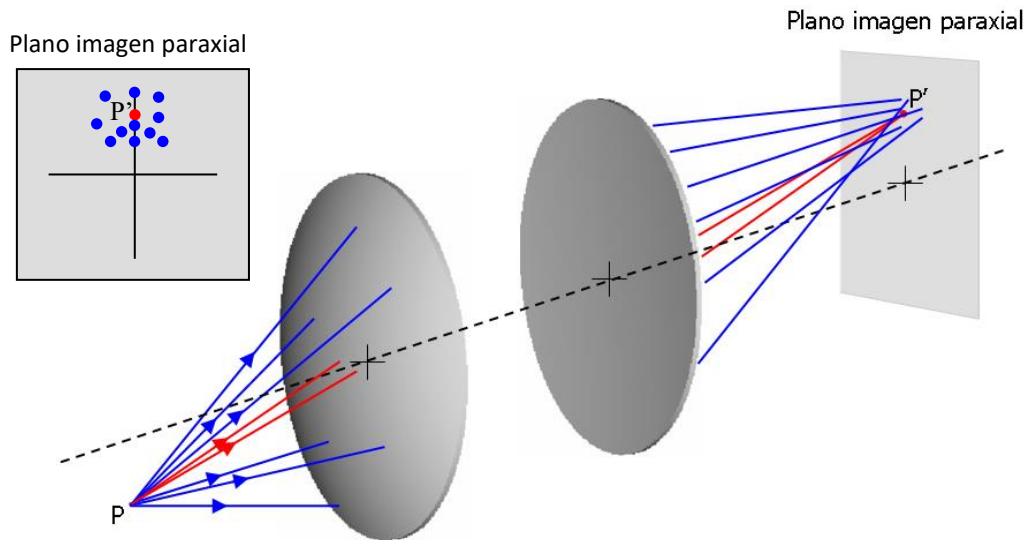
## **PRÁCTICA DE SIMULACIÓN DE SISTEMAS ÓPTICOS CON EL PROGRAMA OSLO EDU**

### **1. Introducción a los programas de diseño óptico**

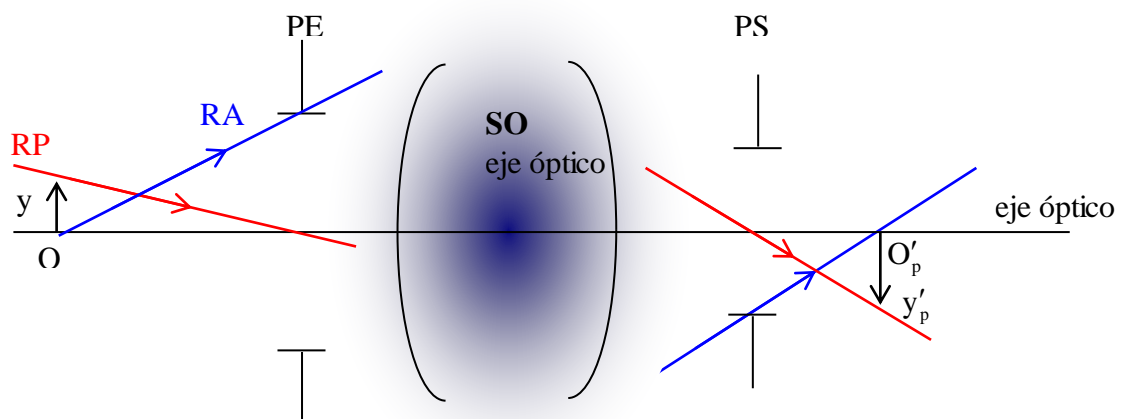
En esta práctica presentamos una introducción general a los programas de análisis y diseño de elementos ópticos. Comenzaremos viendo algunos conceptos básicos relacionados con este tipo de software para, posteriormente, familiarizarnos con la interfaz de usuario del software concreto que hemos seleccionado (OSLO) y con algunas de las opciones más básicas de éste.

#### **1.1 Conceptos previos**

Los programas de diseño óptico basan todos sus cálculos en el trazado (cálculo de la trayectoria) de uno o varios rayos a través de las distintas superficies que componen el sistema óptico (SO) bajo estudio. La marcha de estos rayos se determina aplicando las leyes de la refracción o de la reflexión, cada vez que el rayo debe atravesar un dioptrio (superficie que separa dos medios de índices de refracción diferentes) o se encuentra con un espejo, respectivamente. Se trata pues de rayos “exactos” o “reales” y que por tanto nos permitirán apreciar las aberraciones ópticas presentes en el sistema. En la siguiente figura se muestra un sistema óptico centrado que representamos por sus superficies extremas y un punto objeto P y su imagen paraxial P'. Dentro de la región paraxial, todos los rayos (en rojo) se cortarían a la salida en P'. Si ahora se considera un haz de rayos procedentes de P que no cumplen dicha aproximación, al determinar sus trayectorias a través del sistema, éstas cortarían, en general, el plano imagen paraxial en puntos diferentes a P'. Se obtendrá, por tanto, sobre dicho plano una mancha luminosa alrededor de P', pudiendo hablarse, en cierto sentido, de imagen defectuosa del punto objeto P. A estos defectos en la imagen, en comparación con la situación paraxial, es lo que se conoce como aberraciones.



De todas formas, y dado que bajo la aproximación paraxial cualquier sistema queda totalmente caracterizado trazando un par de rayos linealmente independientes, estos programas, también calculan la marcha paraxial, es decir, utilizando la aproximación paraxial de las ecuaciones de la refracción y reflexión, de dos rayos concretos, **el rayo principal (RP) (rayo que parte del extremo del objeto y que pasa por el centro de la pupila de entrada (PE))** y **el rayo axial (RA) (rayo que parte del pie del objeto y pasa por el extremo de la PE)**. En la siguiente figura se representan, un corte transversal de un SO con simetría de revolución (representado por sus superficies más externas) y la marcha paraxial de este par de rayos.

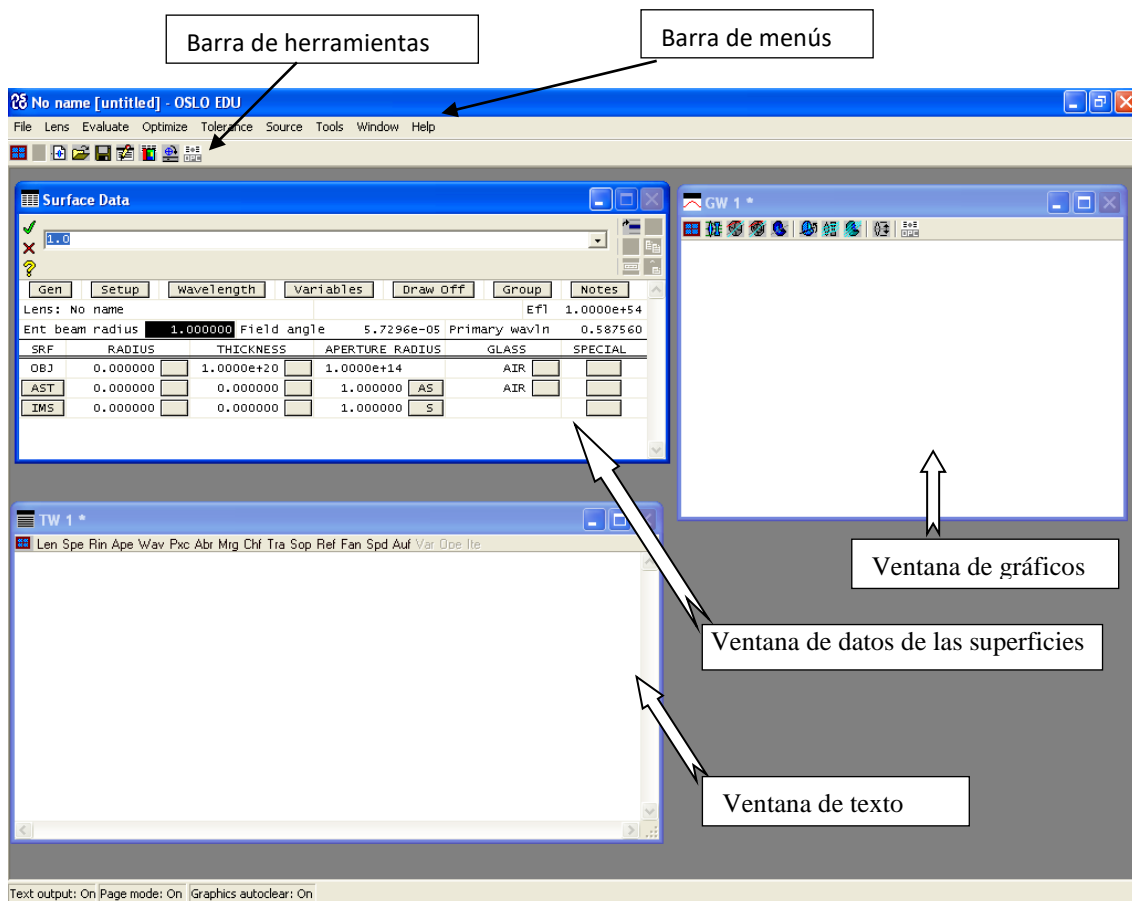


A la salida del SO el punto de corte del RA con el eje óptico proporciona la posición de la imagen paraxial ( $O'_p$ ), mientras que la altura del RP (distancia al eje óptico) en ese plano, el tamaño de la imagen paraxial ( $y'_p$ ). Por otra parte, el punto de corte con el eje óptico del RP

proporciona la posición de la pupila de salida del sistema (PS) y la altura del RA en ese plano su tamaño. Resulta evidente la utilidad de este par de rayos a la hora de determinar las características paraxiales de un SO.

## 1.2 Interfaz de usuario

La interfaz de usuario no difiere en exceso de la de otros programas de Windows. La pantalla o ventana principal consta de una barra de menús desde la que se accede a todos los comandos del programa y de una barra de herramientas configurable con las opciones más utilizadas. En esta ventana principal se pueden, a su vez, abrir diferentes ventanas, desde las que introducir los datos del sistema a analizar y ver los resultados de las diferentes acciones ejecutadas en el programa. De forma general se pueden distinguir tres tipos de ventas: ventana o editor de datos de las superficies, ventana de gráficos y ventana de texto.

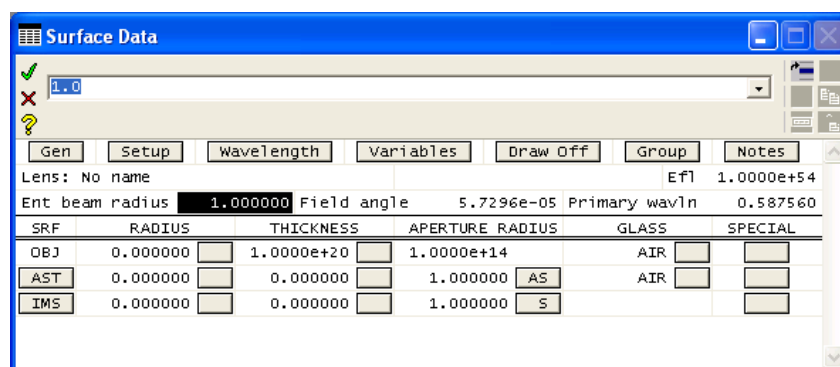


Al tratarse de un programa de nivel profesional, el número de opciones es muy elevado. Muchas de estas opciones o herramientas sobrepasan el nivel que pretendemos alcanzar, por lo que no tiene mucho sentido describir en detalle toda esta barra de menús. Tampoco vamos

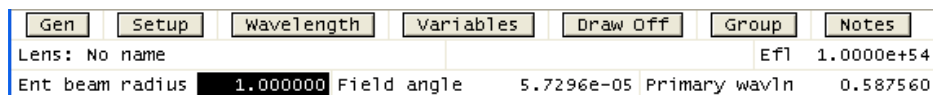
a comentar, aquí y ahora, los menús y opciones que si vamos a emplear, ya que creemos más adecuado verlos en el momento y en el contexto en que vayamos a utilizarlas.

### 1.3 Editor de datos de la superficie

En primer lugar, prestaremos atención a la ventana de datos de las superficies. Está es posiblemente la ventana más importante de todas, desde ella se especifican tanto los parámetros que caracterizan las distintas superficies ópticas del sistema, radios de curvatura, espesores, tamaños, índices de refracción, etc., como las condiciones en las que el sistema opera (apertura y campo). En la siguiente figura se presenta una captura de esta ventana.



Esta ventana esta dividida en dos partes, una fija, la superior, desde donde, como veremos, se especifican las condiciones en que opera el sistema.



Y otra, la inferior, estructurada en filas y columnas, desde donde introduciremos los datos de las diferentes superficies ópticas del sistema.

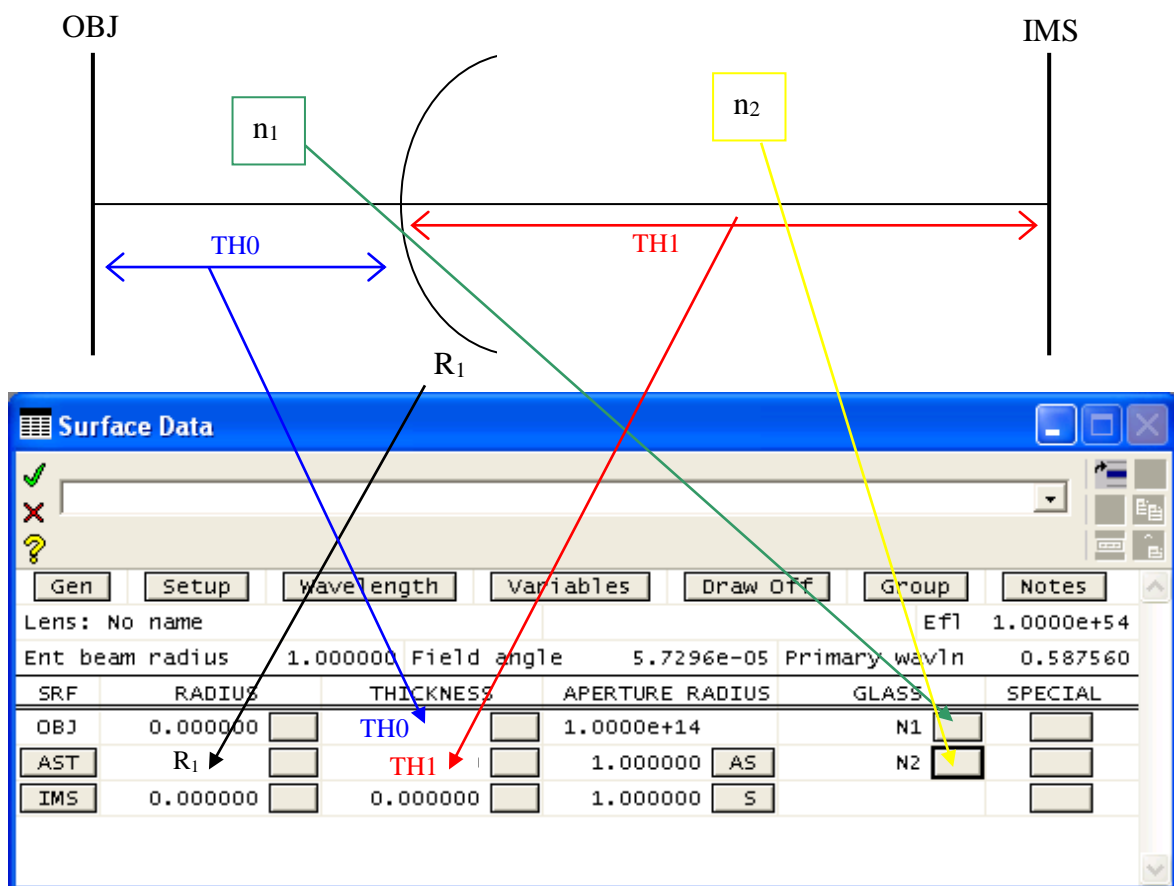
SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS	SPECIAL
OBJ	0.000000	1.0000e+20	1.0000e+14	AIR	
AST	0.000000	0.000000	1.000000 AS	AIR	
IMS	0.000000	0.000000	1.000000 S		

Como todo software de trazado de rayos, el programa calcula la trayectoria de los rayos a través de las diferentes superficies del SO. Por ello, las superficies ópticas van a ser los elementos básicos con los que construiremos cualquier SO, y además habrá que introducirlas en el orden en que los rayos las van a atravesar. En el programa que nos ocupa, los datos de

las superficies se introducen en la parte de la ventana de datos estructurada en filas y columnas.


Cada fila corresponde a una de las superficies del sistema. Siempre aparecen dos filas, la primera y la última, con los nombres “OBJ” e “IMS”, que se corresponden, respectivamente, con el plano objeto y el plano de observación (que podemos hacer coincidir, o no, con el plano imagen). Entre estas dos situaremos tantas filas como superficies tenga el sistema.

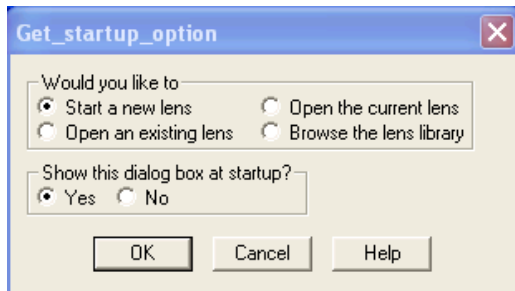
Respecto a las columnas, para cada fila, es decir para cada superficie del sistema, nos permiten especificar el radio de curvatura (columna “RADIUS”), la distancia entre la superficie en la que estamos y la siguiente superficie del sistema (columna “THICKNESS”) y el índice de refracción del espacio comprendido entre la superficie en la que estamos y la siguiente (columna “GLASS”). El siguiente esquema muestra como se introducirían los datos para el caso de un dioptrio esférico de radio  $R_1$  que separa medios de índices  $n_1$  y  $n_2$ .



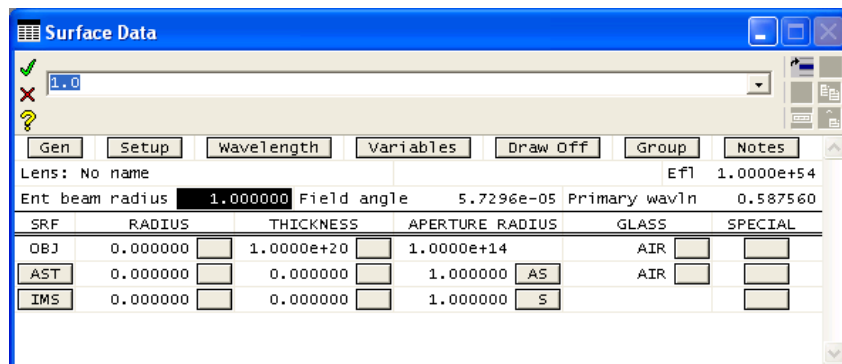
Veamos en un ejemplo numérico todo lo anterior. Nos planteamos estudiar una lente convexo-plana, cuya primera superficie tiene un radio de 75 mm y con la segunda superficie plana, el espesor de la lente es 75 mm. La lente tiene un índice de refracción de  $n=1.5$  para 635

nm. El objeto se encuentra en el infinito. Veamos paso por paso como introduciríamos este sencillo sistema.

Abrimos el  (OSLO), nos aparece una primera ventana en la que seleccionamos “Start a new lens”.



Por defecto, en la ventana de los datos de las superficies aparecen tres filas, por lo que tendríamos que añadir una más. (objeto, lente (2 superficies) y plano de observación).



Antes de comenzar a introducir los datos, vamos a comentar el criterio de signos que emplea el OSLO:

- La distancia de una superficie a otra (columna “THICKNESS”) será positiva si la segunda de las superficies se encuentra a la derecha de la primera y negativa en caso contrario (éste sería el caso, por ejemplo, en el que la primera de las superficies fuera un espejo).

- Los radios de curvatura se consideran positivos para las superficies convexas y negativos para las cóncavas.

Vayamos introduciendo los datos fila por fila, es decir, superficie por superficie.

La primera fila corresponde al plano objeto.

Dado que consideramos que es un plano en la columna “Radius” deberíamos poner  $\infty$ . En esta columna cuando ponemos un 0 el programa entiende que la superficie a la que

corresponde esa fila es plana. Esto es, en la columna "Radius", y solo en ella, un 0 es equivalente a  $\infty$ .

En la columna "Thickness" debemos colocar la distancia a la siguiente superficie que atravesarán los rayos. Como el objeto está en el infinito pondríamos  $1e+20$


Por último, en la columna "Glass" debemos poner el índice de refracción del medio existente entre la superficie en que estamos y la siguiente. Por defecto, el programa pone "Air" que justamente es lo que tenemos nosotros entre el objeto y la primera superficie de nuestro sistema, por tanto, lo dejamos tal y como está.

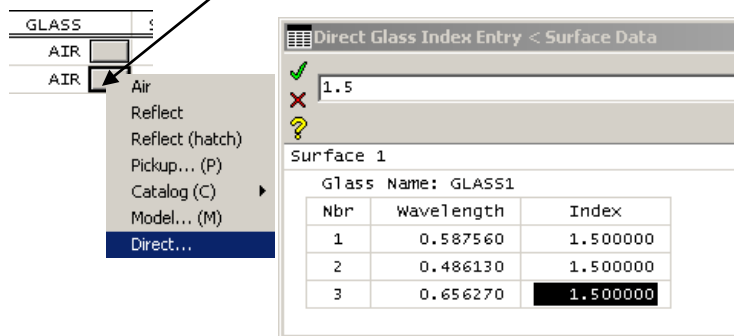
Pasemos a la siguiente fila, es decir a la primera superficie de la lente.

Se trata de una superficie esférica convexa de radio 75 mm, que separa aire de un medio de índice  $n=1.5$

En la columna "Radius" colocamos 75.

En la columna "Thickness" deberíamos colocar la distancia a la siguiente superficie, en este caso la segunda superficie de la lente está a 75 mm.

Para introducir el índice de refracción, haz clic en el rectángulo gris de la columna "Glass" de la fila en la que estamos y escoge la opción "Direct", esto provoca que se abra un menú como el de la figura, donde debemos insertar el valor del índice de refracción para tres valores de la longitud de onda (por si se quiere considerar la dispersión cromática). En nuestro caso, colocaremos el mismo valor 1.5 para las tres. Aceptamos los cambios presionando OK .

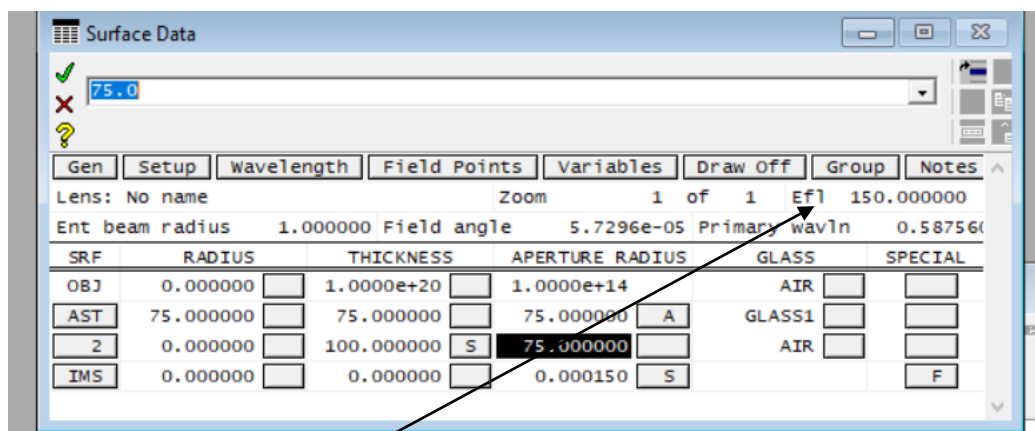


A continuación, introducimos la segunda superficie, que es una superficie plana por lo que dejaremos en la casilla de “Radius” el valor 0.

En la casilla Thickness vamos a calcular la posición de la imagen. Para ello seleccionamos la casilla cuadrada y dentro de ella la opción “Solve”. Nos aparecerán tres opciones. Elegimos la primera “Axial Ray Height” y damos a intro. Con esta opción le imponemos como condición que la altura del rayo axial en el plano imagen sea 0.

Por último, nos faltaría introducir el tamaño de la lente (aperture radius), que consideramos 75 mm para ambas superficies.

Tras seguir estos pasos ya tendríamos introducido el SO que pretendemos estudiar. La ventana quedaría de la siguiente forma:

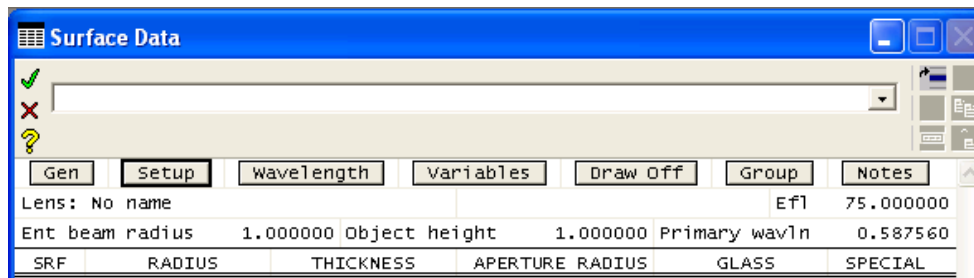


Podemos comprobar que hemos introducido correctamente los datos del sistema fijándonos en el valor de la celda “EFL” que no es más que la focal del sistema introducido y que podríamos calcular a partir de los radios.

Por otra parte, este tipo de programas están creados con el fin de servir para diseñar sistemas ópticos, por lo que dos de los parámetros más importantes a tener en cuenta son el campo y la apertura bajo la que debe funcionar el sistema. Por ello, además de introducir los datos de las superficies que componen el sistema, es necesario especificar el campo con el que va a trabajar el sistema (tamaño del objeto, si éste está a distancia finita, o campo angular objeto si trabajamos con objeto en el infinito) y el tamaño del haz con el que trabajaremos (hay diversas formas de especificarlo, nosotros, generalmente utilizaremos el radio del haz sobre la primera superficie del sistema “Ent beam radius” aunque también se puede utilizar, por ejemplo, la apertura numérica o el número f).

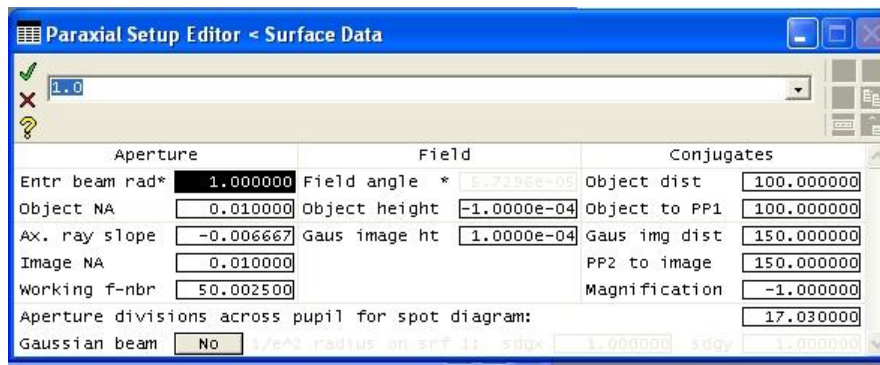
En el siguiente esquema se muestra como se introducirían estos datos y su significado.





A la hora de introducir estos datos (campo y apertura) podemos hacerlo directamente, en la ventana de datos de las superficies, como se muestra en la figura anterior o bien utilizar una opción más avanzada y con un abanico de posibilidades más amplio e interesante, que pasamos a comentar a continuación.

Al presionar el botón **Setup** aparece la ventana “Paraxial Setup Editor”, donde aparecen tres columnas desde las que podremos especificar las condiciones de apertura, campo y posición del objeto o la imagen en las que trabajará el SO bajo estudio.



Como se observa, cada una de estas características podemos especificarla de diversas maneras.

Por ejemplo, la apertura del sistema la podemos definir:

- 1) Dándole un valor al “Ent beam rad”, que es, como ya hemos comentado, el radio del cono de luz procedente del objeto que vamos a considerar que penetra en el SO.
- 2) Con el valor de la apertura numérica en el espacio objeto, “Object NA” o imagen “Image NA”.
- 3) Con el valor del número de diafragma o número f, “Working f-nbr”.
- 4) Con el valor de la pendiente a la salida del sistema del rayo axial “Ax. Ray slope”.

De la misma forma, el campo lo podemos fijar:

- 1) Con el valor del campo angular objeto "Field angle" en grados.
- 2) Con el tamaño del objeto "Objetc height".
- 3) Con el tamaño de la imagen paraxial "Gaus image ht".

Por último, la posición del objeto la podemos especificar:

- 1) Por la distancia desde el objeto a la primera superficie del sistema "Object dist".
- 2) Por la distancia desde el objeto al plano principal objeto del sistema "Object to PP1".
- 3) Por la distancia desde la última superficie del sistema a la imagen paraxial "Gaus img dist".
- 4) Por la distancia desde el plano principal imagen a la imagen paraxial "PP2 to image".
- 5) Dando el valor del aumento lateral "Magnification".

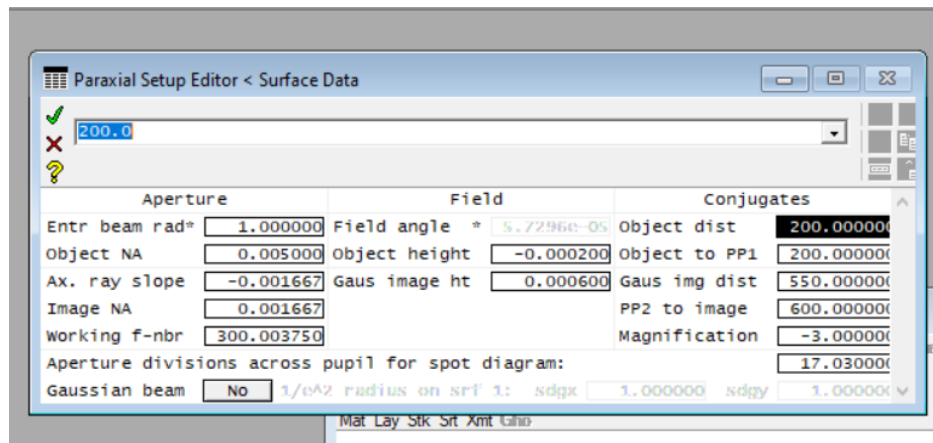
Respecto a todas estas opciones hay que tener en cuenta varias cosas.

La primera es que, especificando uno de los posibles campos para cada una de las columnas el programa calcula automáticamente el valor que les corresponde a los otros campos.

De esta forma, podemos utilizar, por ejemplo, la columna "Conjugates" (aparte de para especificar la posición del objeto) como una especie de calculadora paraxial.

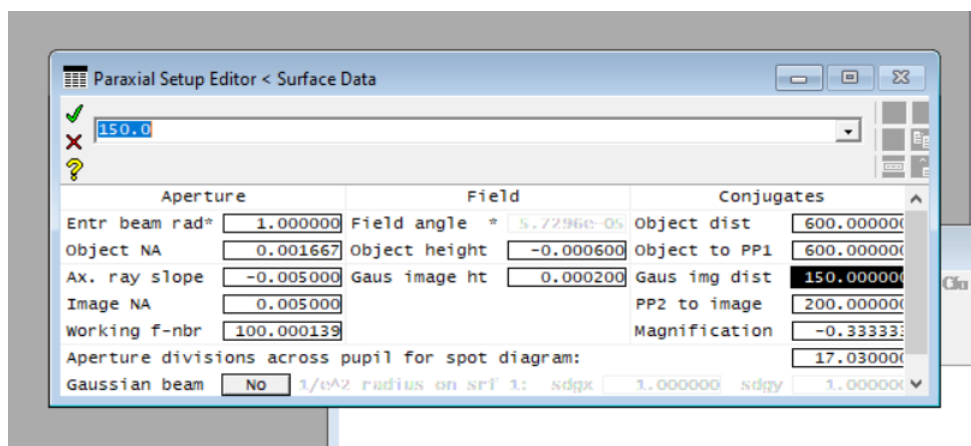
Inicialmente, al abrir esta ventana nos aparece que la distancia desde el objeto a la primera superficie del sistema "Objetc dist" es infinito (valor que habíamos introducido nosotros en la fila "OBJ", columna "THICHNESS"). Tenemos también la distancia a los puntos principales objeto e imagen y la posición a la imagen paraxial. Veamos un par de ejemplos más.

Introduce en el campo "Object dist" el valor de 200, Debe quedarte:



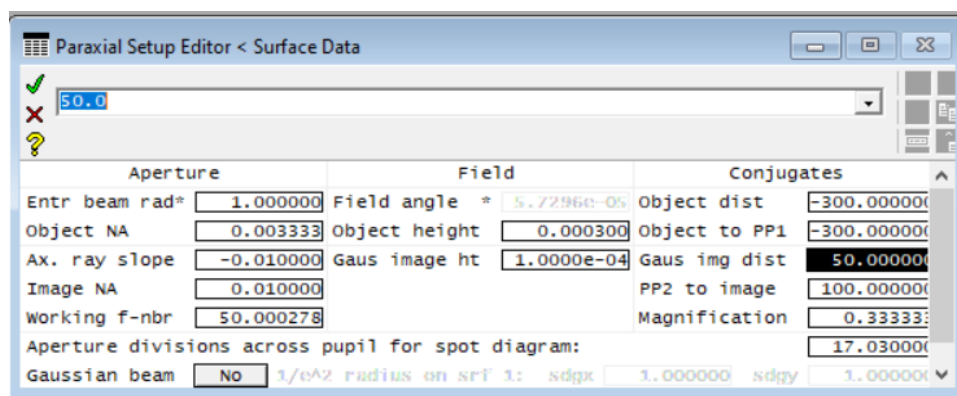
La imagen paraxial está a 550 mm y el aumento es -3.

Nos plantemos ahora, dónde debería estar el objeto para que la imagen caiga 100 mm por detrás de la lente. Para ello, simplemente tenemos que introducir el valor 100 en el campo “Gaus img dist”, con lo que obtenemos:



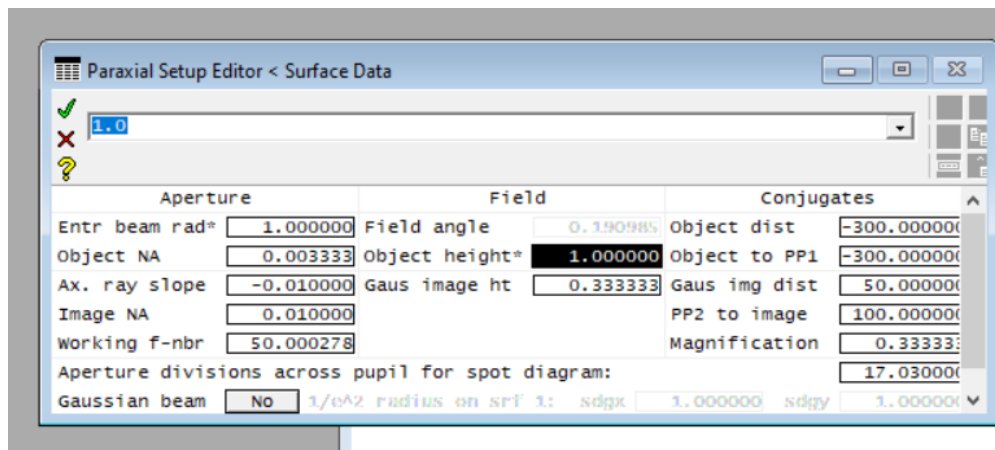
Esto es, el objeto debería estar 600 mm por delante de la lente y vemos que el aumento lateral es, ahora, -0.33.

Finalmente, queremos que la imagen se forme 50 mm por detrás de la lente.



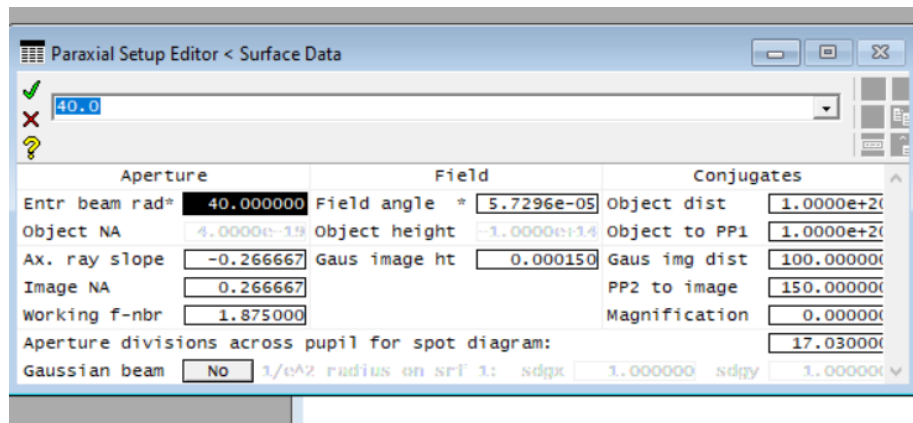
A la vista del resultado, el objeto debe ser virtual y estar situado 300 mm por detrás de la lente, de tal forma que la distancia objeto-primer superficie es negativa (prestar atención al criterio de signos).


Pasemos a ver las posibilidades a la hora de introducir el campo (columna “Field”). En el ejemplo anterior, donde tanto el objeto como la imagen están a distancias finitas (-300 y 50 respectivamente), el programa nos deja especificar, o bien la altura del objeto “Object height” o bien la altura de la imagen paraxial “Gaus image ht”, por ejemplo, si consideramos que la altura del objeto es 1 mm, automáticamente nos calcula que la altura de la imagen paraxial será, como era de esperar dado el valor del aumento lateral, 0.33 mm.




Si volvemos sobre el primer ejemplo, en el que el objeto estaba en  $\infty$ , evidentemente, solo tiene sentido hablar del tamaño angular del objeto “field angle”, o bien, del tamaño de la imagen, ya que ésta sigue estando a distancia finita.

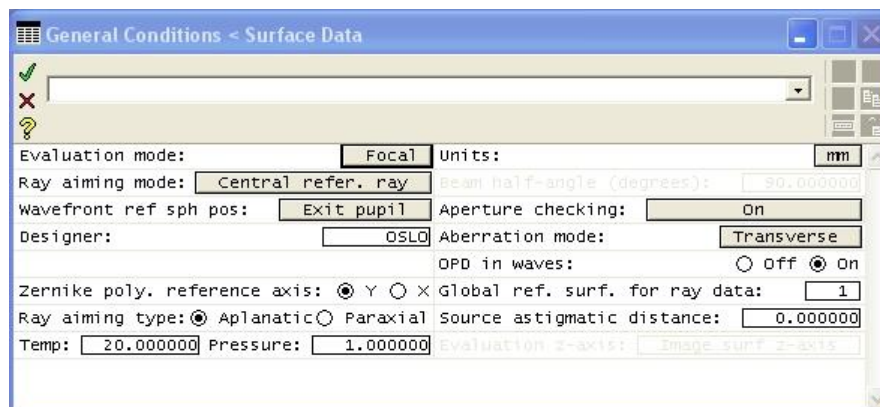
Vamos a suponer que trabajamos con un objeto puntual, situado en  $\infty$ . Esto implica que el valor de “Object dist” debe ser  $1E16$  o mayor y que el de “Field angle”  $0^\circ$ . Comprobad como al poner  $0^\circ$  en “Field angle” el programa lo cambia por  $5.73e-05$  (esto significa que valores iguales o inferiores a ese, para el programa, son equivalente a  $0^\circ$ ). Y por tanto, el valor que pone en “Gaus image ht” ( $5e-05$ ) nos marca también el límite inferior en el tamaño de la imagen, a partir de ese valor el programa lo toma como 0. Para finalizar vamos a establecer en 40 mm el tamaño del haz de rayos a la entrada del sistema, esto es, ponemos en “Ent bem rad” 40 mm. La ventana quedaría:



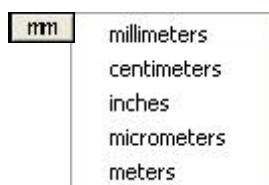
Aceptamos los cambios presionando OK . De esta forma, la ventana de datos de la superficie ha incorporado todos estos cambios.

Si hubiésemos presionado Cancelar , en la ventana de datos de la superficie los valores serían los mismos que teníamos antes de acceder a la opción **Setup**.

Por último, comentar, que al presionar el botón **Gen** se accede a las condiciones generales cuyos valores por defecto son válidos para la mayoría de los sistemas ordinarios.




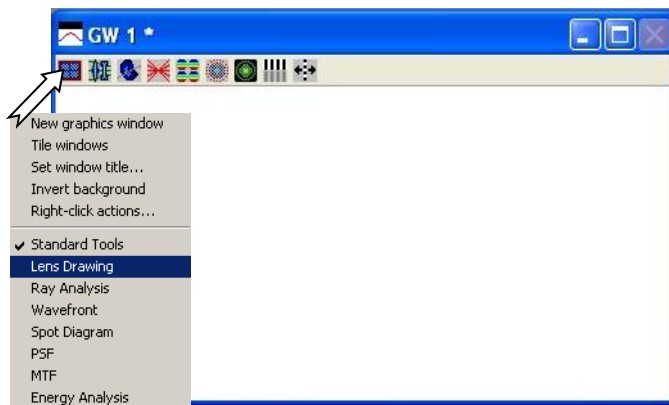
Únicamente apuntar, que en la opción “Evaluation mode” podemos elegir entre **Focal**, para sistemas en con focal definida y **Afocal** para sistemas afocales (por ejemplo un telescopio astronómico). Y que mediante la opción “Units” seleccionamos la unidad de medida para las distancias (por defecto esta establecida en mm).



#### 1.4 Ventana de gráficos


A continuación, nos vamos a centrar en configurar la ventana de gráficos o dibujo. Desde esta ventana se pueden obtener tanto dibujos y esquemas del sistema 2D y 3 D, como gráficas del comportamiento de diferentes características ópticas del sistema, como pueden ser las diferentes aberraciones, la MTF, la PSF, etc. Nosotros nos vamos a fijar, de momento, en las opciones relacionadas con obtener dibujos y esquemas del sistema óptico bajo estudio y en los que se trazan haces de rayos concretos.

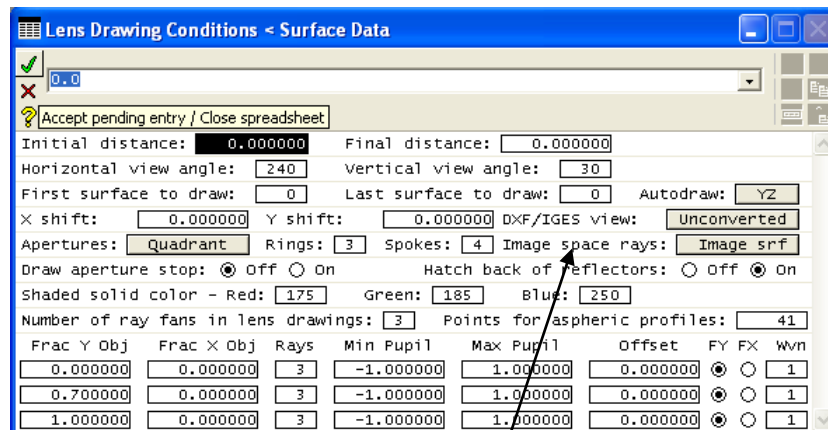
Para ello, en primer lugar, vamos a cambiar la barra de herramientas de esta ventana, desde la Standard, que es la que tenemos por defecto, a una específica que contiene todas las opciones referidas al dibujo del sistema. Presionamos el botón “Setup window/toolbar”  de la venta de gráficos y elegimos la opción “Lens Drawing”.



La barra de herramientas cambia a:

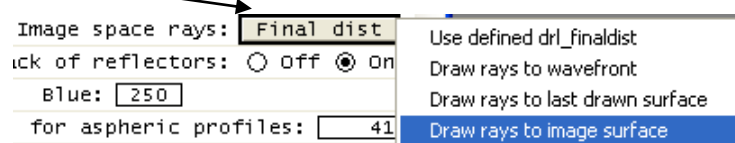


Presionamos, ahora, el botón “Edit lens drawing conditions” . Con lo que se abrirá la ventana “Lens Drawing Conditions”:

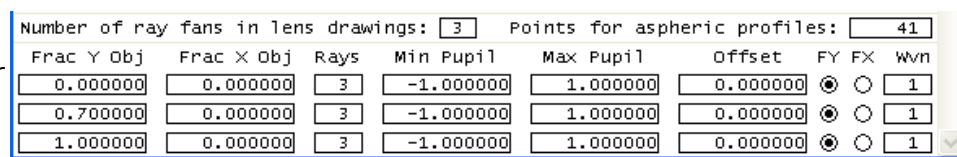


Lo primero que hacemos es fijarnos en el ítem "Image space rays". Desde aquí podemos seleccionar hasta que plano en el espacio imagen queremos que se dibujen los haces de rayos.

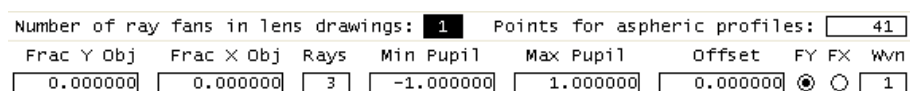
Lo más recomendable es que los dibuje hasta la superficie "IMS", que se corresponde con el plano de observación y que recordemos, podemos hacer coincidir, o no, con el plano imagen paraxial. Por ello, nos aseguramos que la opción elegida sea **Image srf**. Si no es así, presionamos el botón y seleccionamos "Draw rays to image surface".



Para especificar los haces de rayos que deseamos que sean dibujados, nos fijamos en la parte final de la ventana de la que estamos hablando ("Lens Drawing Conditions").



Así, el número de haces de rayos que dibuja vienen fijado por el ítem "Number of ray fans in lens drawings", por defecto aparece 3, nosotros, de momento, colocaremos 1. De esta forma, de las tres filas que aparecían inicialmente (una para cada haz), solo quedará una.



Respecto a las diferentes columnas, su significado es el siguiente:

Con “Frac Y Obj” y “Frac X Obj”, especificamos el punto objeto en coordenadas normalizadas a la unidad (en el plano YX) desde el que los rayos son trazados. Un valor 0 correspondería a un punto objeto en eje, y un valor 1 a un haz de rayos que procedería de el punto extremo del objeto.

Con “Rays”, especificamos el número de rayos dibujados, procedentes del punto objeto escogido.

Por último, con “Min pupil” y “Max pupil”, definimos el rango de la pupila de entrada que los rayos procedentes del punto objeto llenan. El programa distribuye uniformemente el número de rayos que hayamos definido llenando completamente el rango de la pupila escogido. Este ítem también se especifica en coordenadas normalizadas.


Veamos en algunos ejemplos el funcionamiento de estas opciones.

En un primer momento, una vez hemos seleccionado que solo dibuje un haz de rayos, dejamos el resto de valores tal y como salen.

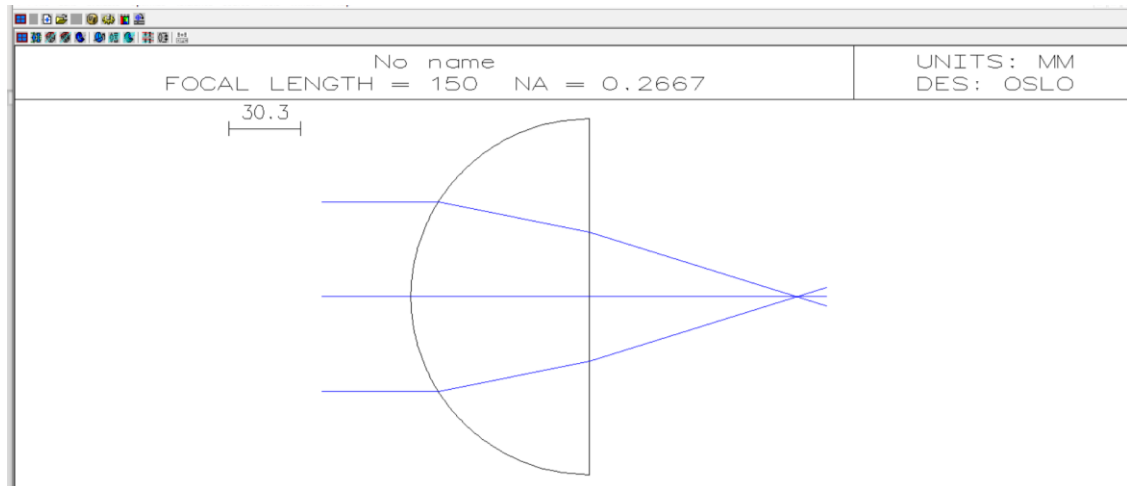
Number of ray fans in lens drawings: <b>1</b>				Points for aspheric profiles: <b>41</b>			
Frac Y Obj	Frac X Obj	Rays	Min Pupil	Max Pupil	Offset	FY FX Wvn	
0.000000	0.000000	3	-1.000000	1.000000	0.000000	<input checked="" type="radio"/> <input type="radio"/> <b>1</b>	

De esta forma el haz de rayos que dibuje procederá del pie del objeto y tendrá tres rayos que se distribuirán uniformemente entre el extremo inferior (“Min pupil” = -1) y superior (“Min pupil” = 1) de la pupila del sistema, lo que implica que pasarán uno por el extremo inferior, otro por el centro y otro por el extremo superior.

Recordemos que el sistema que estábamos analizando era una lente donde teníamos un objeto puntual (campo angular objeto = 0) situado en infinito. La pantalla de observación (superficie “IMS”) está a 100 mm por detrás del dioptrio, coincidiendo en este caso con la imagen paraxial, es decir, con el foco imagen del dioptrio.

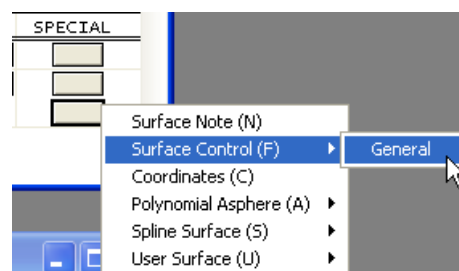
Únicamente nos queda clicar en el icono “Draw sistem (2D)”  de la ventana de gráficos. Con lo que obtenemos el siguiente dibujo.



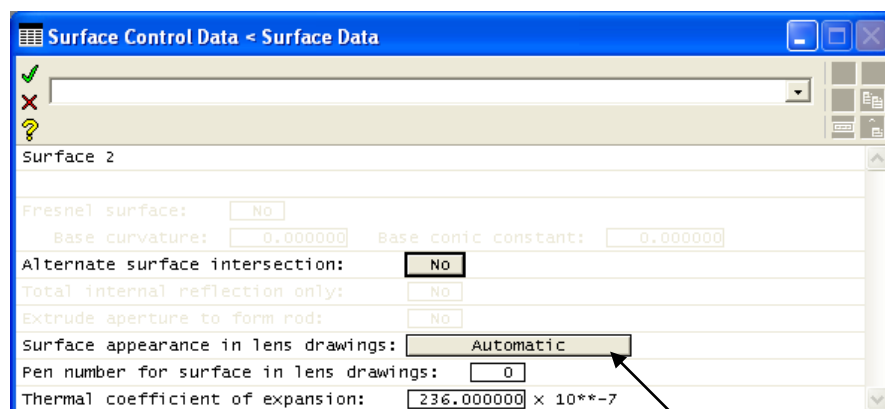


Donde se observa, tres rayos que se cortan un poco antes de la pantalla de observación, porque el sistema presenta aberración esférica. Si el tamaño del haz fuera por ejemplo 5 mm, estos rayos cortarían en el plano paraxial. Para ver mejor donde tenemos situada la pantalla de observación resulta interesante utilizar la siguiente opción:

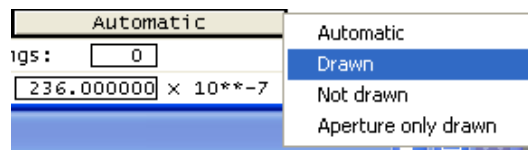
En la fila correspondiente a la pantalla ("IMS") presionamos el botón de la columna "SPECIAL" y elegimos la opción "Surface Control(F)>>General".



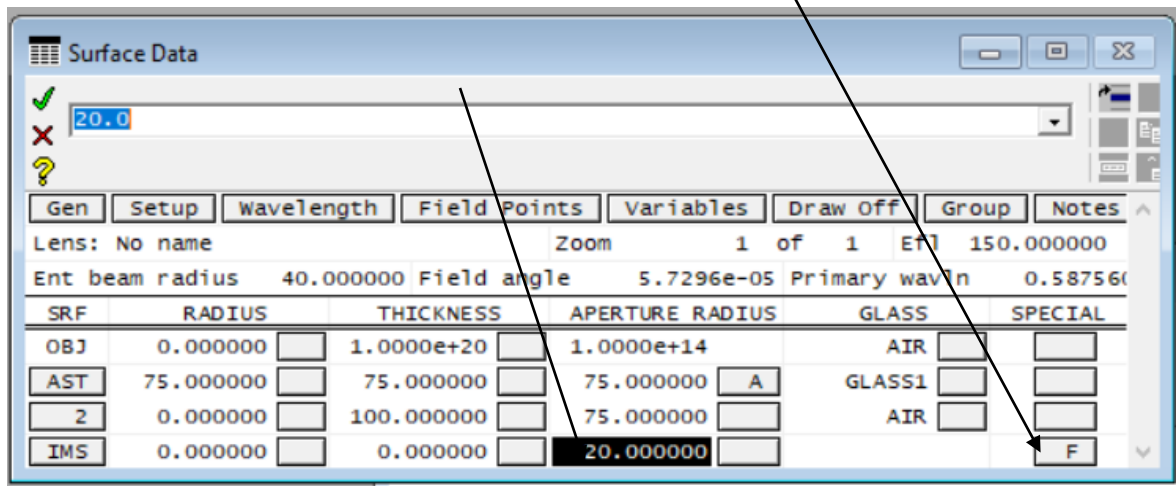
Se abre la siguiente ventana:



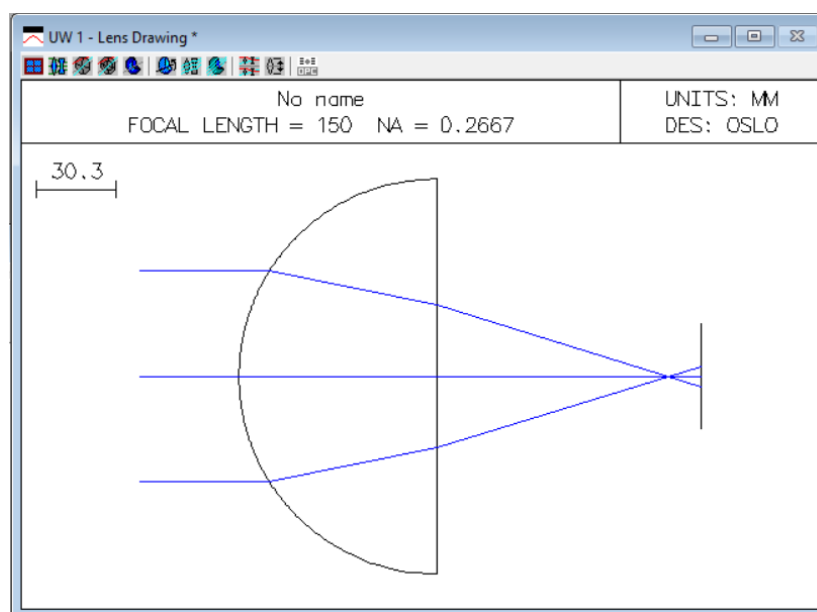
Cambiamos el valor del item "Surface apperance in lens drawings", inicialmente con la opción "Automatic", por el valor "Drawn".



De esta forma forzamos al programa a que dibuje explícitamente la superficie "IMS". Ya que por defecto, únicamente dibuja las superficies donde hay un cambio de índice de refracción. Podemos comprobar cómo, ahora, aparece una F en el botón "special" de la fila "IMS". Además, hemos cambiado también el valor de la columna "APERTURE RADIUS" de la superficie "IMS", poniendo el valor 20. Esta columna controla el tamaño físico de la superficie correspondiente.



Si volvemos a dibujar el sistema, obtenemos,




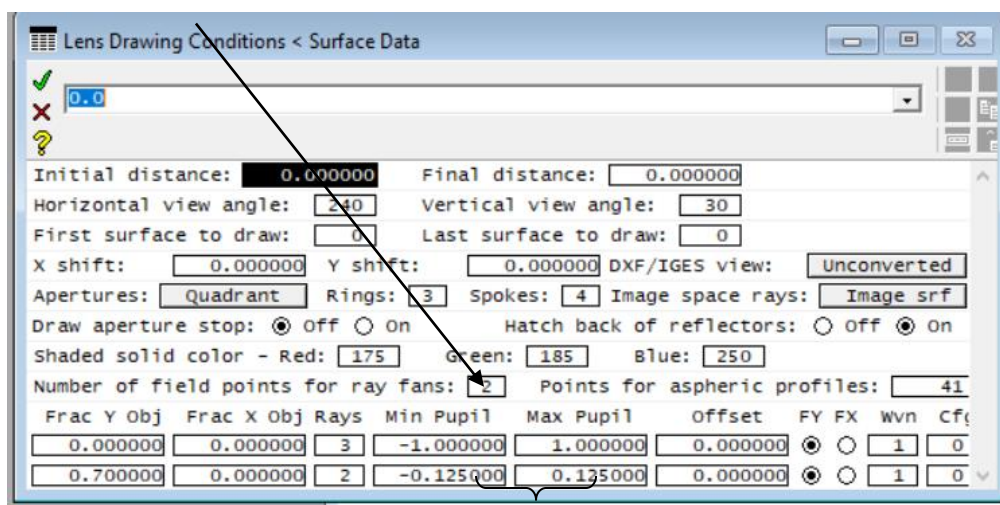
Dónde se ve claramente la pantalla de observación (hemos obligado al programa a dibujarla y además con un tamaño de 40 mm de diámetro (20 mm de radio)). También dibuja la lente (esto lo hace por defecto ya que en esa superficie si hay un cambio en el índice de refracción). En cuanto al tamaño de la lente, viene fijado por el valor de la celda de la columna “APERTURE RADIUS” de la fila correspondiente a esta superficie, que como se observa es de 75 mm.

En este caso ese valor lo hemos introducido nosotros, pero el programa puede calcular el valor de esa celda para que el haz de rayos atraviese el sistema siempre que tengamos una S (Solve). En general cuando tengamos S en una celda, significa que el valor de esa celda es determinado por el programa en base a alguna condición.

En particular, aparece siempre por defecto en las celdas de la columna “APERTURE RADIUS”, a excepción de la fila “OBJ”. El criterio que utiliza para calcular el valor de estas celdas, que recordemos determinan el tamaño físico de las diferentes superficies del sistema, es que los haces que entren al sistema no sean recortados por ninguna de las superficies del sistema. Por tanto, el valor de estas celdas dependerá de los valores que definamos tanto para el “Ent bean radius” como para el tamaño del objeto.

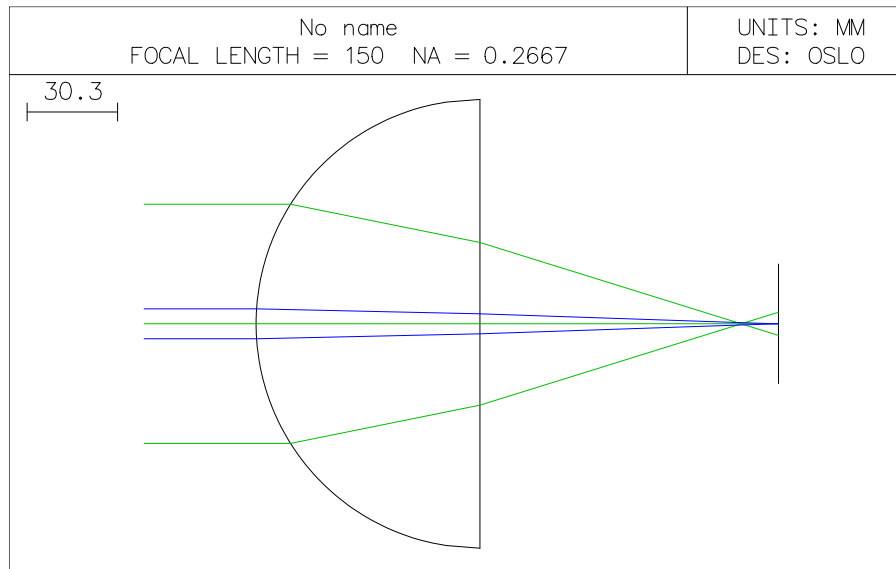
Vamos a ver cómo dibujar algunos rayos concretos. Por ejemplo, nos planteamos obtener un esquema en el que aparezcan los rayos que acabamos de dibujar más otros dos que incidan a una altura de  $\pm 5$  mm.

Para ello, vamos a modificar la ventana “Lens Drawing Conditions” (recordemos que se accede a ella presionando el botón ). Y realizamos las siguientes modificaciones. En el item “Number of ray fans in lens drawings” ponemos un 2 (vamos a dibujar dos haces de rayos).



Los dos haces van a proceder del pie del objeto, por tanto “Frac Y Obj” = 0 para ambos.

El primer haz lo dejamos tal y como lo teníamos, mientras que el segundo haz va a estar constituido por 2 rayos (colocamos un 2 en la columna "Rays") y dado que deben entrar al sistema pasando por -5 y 5 mm y que el haz abarca desde -40 a 40 mm ("Ent beam radius" = 40) pondremos en la columna "Min Pupil" =  $-5/40$  y en "Max pupil" =  $5/40$ . Volvemos a dibujar, obteniéndose,



Dónde se observa cómo los rayos que inciden más próximos al eje (-5 y 5 mm) si cumplen la aproximación paraxial cortándose en el plano imagen paraxial.

### Ejemplo:

1. Dadas una lente con las siguientes características

$$R_1 = 20 \text{ mm}$$

$$R_2 = -20 \text{ mm}$$

$$e = 3 \text{ mm}$$

$$n = 1.5$$

$$\text{Diámetro} = 10 \text{ mm}$$

- a. Calcula la posición de los planos principales y focales.
- b. Representa mediante el OSLO el trazado de rayos de este sistema para tres haces (uno que pasa a 4 mm, un segundo a 2 mm y un tercero a 0,5 mm)
- c. ¿Dónde se forma la imagen de un objeto real situado a 200 mm de la primera lente? Calcula el aumento en este caso ¿Y si el objeto es virtual?

## 2. Estudio de las Aberraciones

En esta parte se realizará un ejercicio en el que se muestra cómo observar algunas aberraciones monocromáticas (aberración esférica, coma, astigmatismo, curvatura de campo y distorsión) y se indican algunas de las posibilidades de este tipo de programas a la hora de

analizar un sistema óptico. También se aprovecha para ver cómo aplicar una sencilla optimización del sistema.

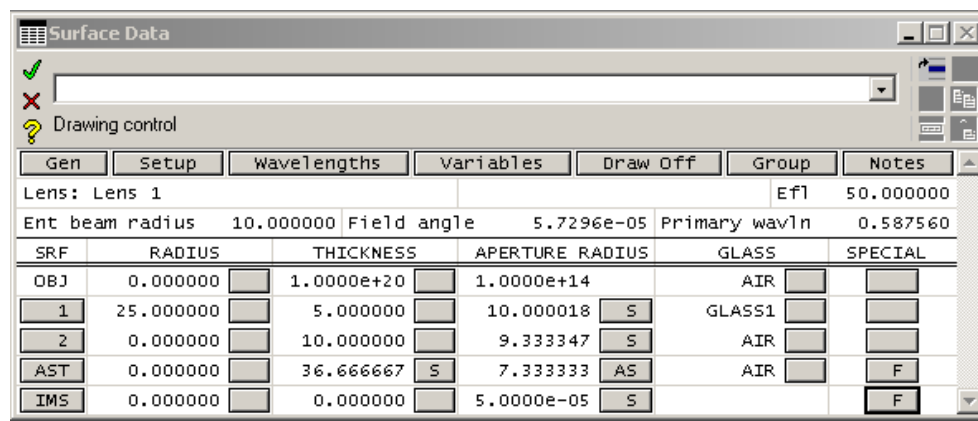
## 2.1 Datos de la lente

El sistema está constituido por una lente simple convexo-plana y un diafragma a una cierta distancia de la lente.

Consideraremos un objeto situado en el infinito y de tamaño angular cero, es decir en el sistema únicamente entrará un haz de rayos paralelo al eje cuyo tamaño vamos a establecer considerando que tiene un radio de 10 mm.

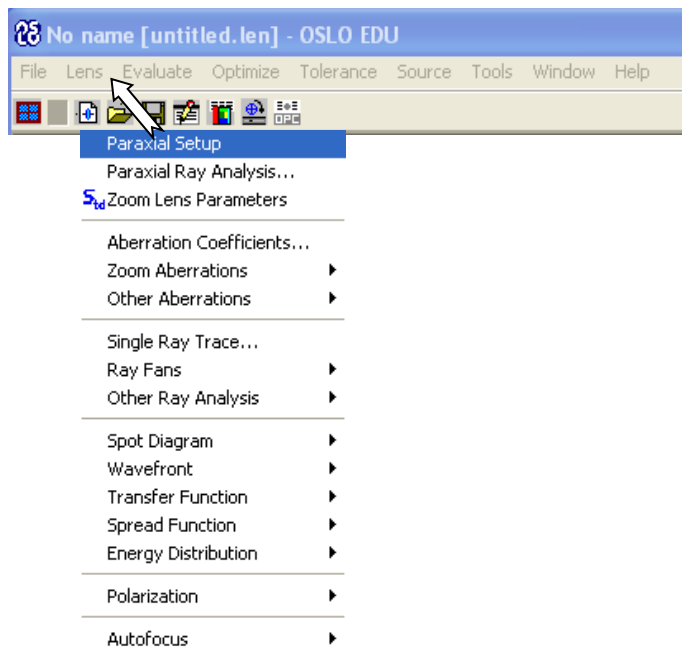
El radio de curvatura de la superficie convexa de la lente suponemos que es 25mm. El espesor 5 mm y el índice de refracción 1.5. La distancia de la lente al diafragma es 10 mm.

La distancia desde el diafragma a la pantalla lo estableceremos utilizando “axial ray height solve”.

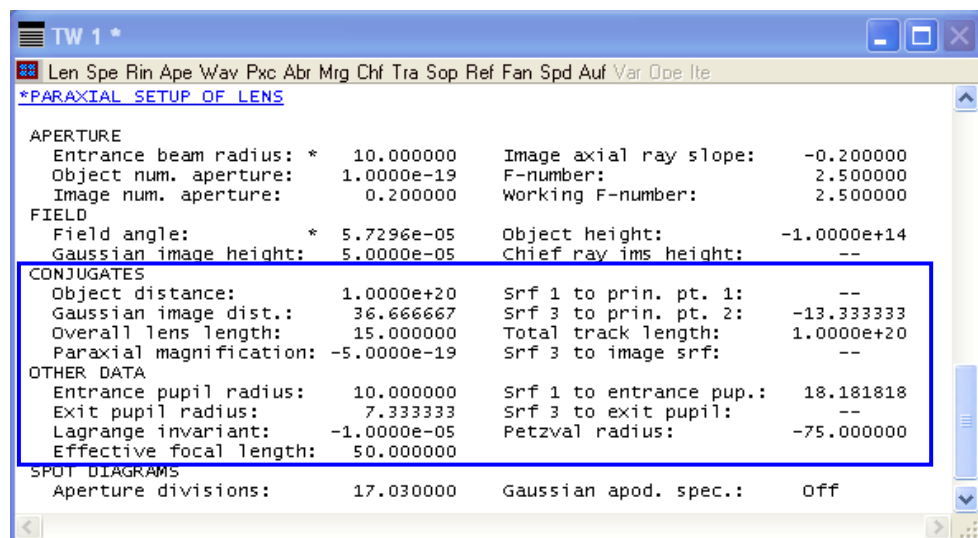


Como prueba asegúrate de que tienes el mismo valor de la Efl (la focal del sistema), y que los botones tienen las mismas etiquetas. La S en el botón “thickness” significa que el valor de esa celda es determinado por un “solve” (axial ray height solve). La S en los botones de la columna “apertura” también significa que los valores son determinados por el programa. Esta es la opción por defecto en las “aperturas” (tamaño de los elementos) y se basa en los valores de el “entrance beam radius” y el “field angle”. El programa calcula el tamaño de los diferentes elementos de forma que no exista viñeteado (teniendo en cuenta que elemento hemos elegido como diafragma de apertura, en nuestro caso es la superficie 3).

Una vez introducidos los datos del sistema, es posible determinar sus características paraxiales. La focal aparece automáticamente en la propia ventana de las superficies pero el resto de las características (planos principales, pupila de entrada, de salida, aumento, etc.) se pueden obtener de manera sencilla sin más que elegir la opción “paraxial setup” del menú “Lens”.



Aparecerá en la ventana de texto la siguiente información:



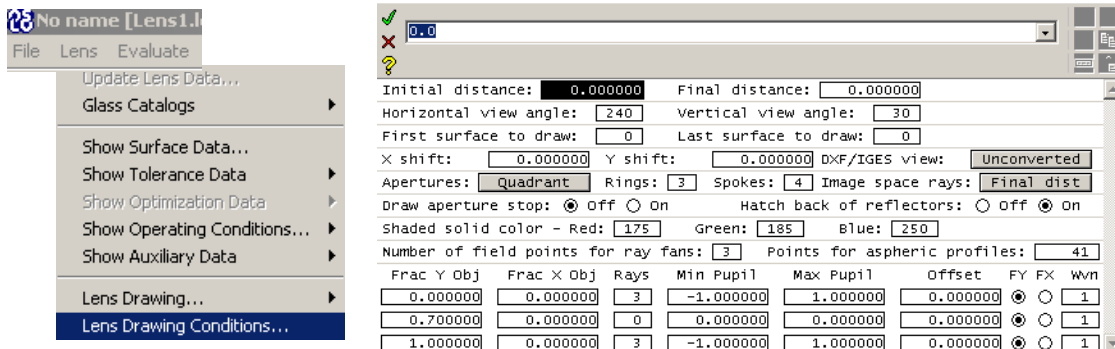
En la zona recuadrada se puede ver la información respecto a la posición del objeto ("Object distance", distancia desde el objeto a la primera superficie del sistema), la distancia a la que se formará la imagen paraxial ("Gaussian distance", distancia desde la última superficie del sistema a la imagen paraxial), así como la posición de los planos principales objeto ("prin. pt. 1") e imagen ("prin. pt. 2") medidos desde la primera superficie del sistema y desde la última respectivamente.

También nos da la información del tamaño de las pupilas de entrada y salida y de sus posiciones medidas nuevamente desde la primera y desde la última superficie del sistema.

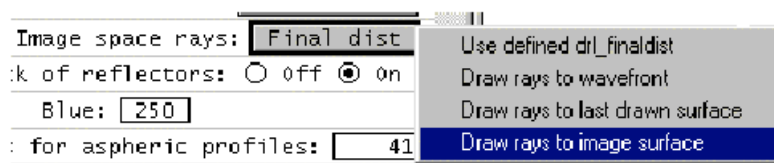
## Ventana de Dibujo

A continuación nos vamos a centrar en configurar la ventana de dibujo, de forma que nos realice un esquema del sistema que estamos estudiando y nos trace un haz de rayos determinado.

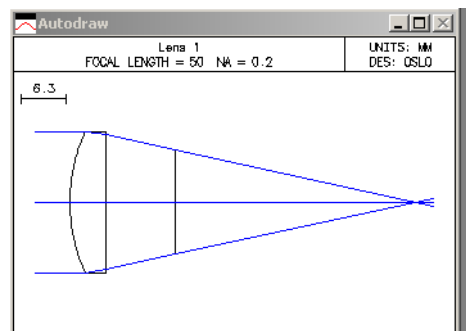
En primer lugar analicemos la configuración de esta ventana. En el "Lens" menú de la barra principal de herramientas, selecciona la opción "Lens Drawing Conditions". Se abrirá la siguiente ventana:



Lo primero que cambiamos es el ítem "Image space rays" de la opción "Final dist" a "Draw to image surface" (así dibujará los rayos hasta la última superficie del sistema, la superficie imagen).



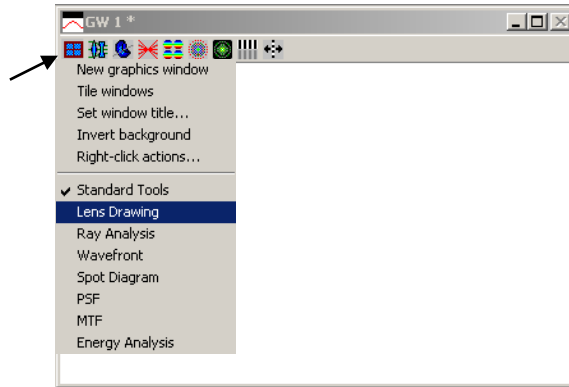
El dibujo que se obtiene debe ser de la forma:



Donde se puede apreciar una cierta cantidad de aberración esférica.

## Aberración Esférica

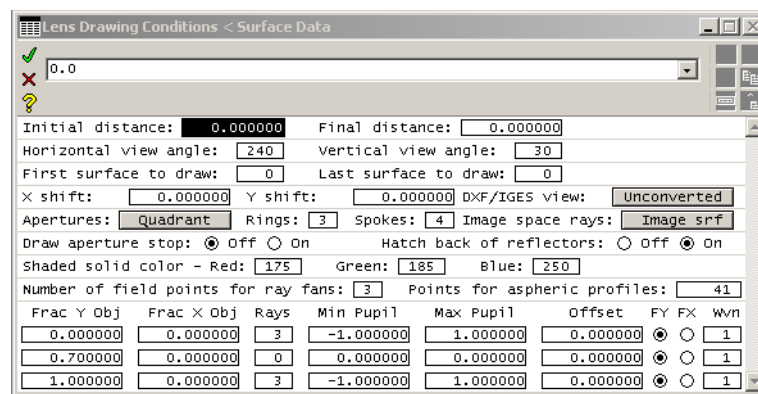
En primer lugar, nos centramos en el estudio de la aberración esférica. Para apreciar mejor su efecto, dibujemos un mayor número de rayos. Para ello haz clic en el botón “Setup window/toolbar” de la venta de gráficos y elige la opción “Lens Drawing”.



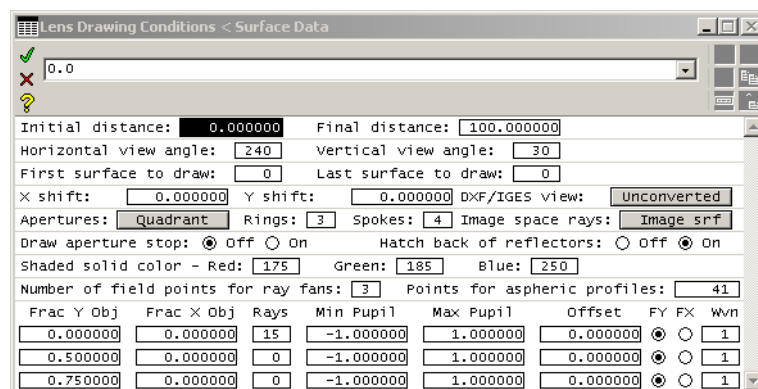
La barra de herramientas cambia:



Presiona ahora el botón “Edit lens drawing conditions”

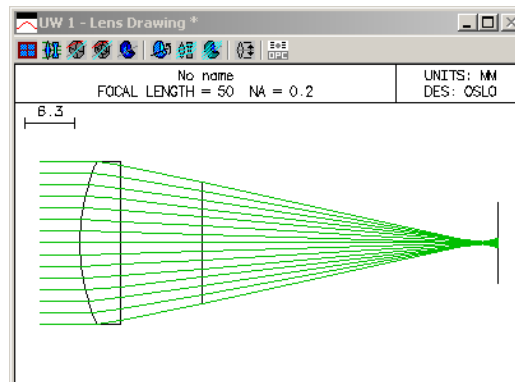


Realiza los siguientes cambios (15 rayos en el primer haz)



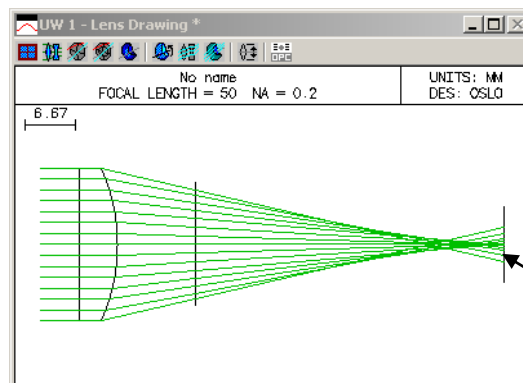


Cambia también el valor de la “Aperture Radius” (4ª columna) de la fila IMS a por ejemplo 5 (De esta forma en el dibujo se puede observar el plano imagen paraxial).



Plano focal  
paraxial

Si ahora giramos la lente 180° (la focal continúa teniendo el mismo valor). Se observa:



Círculo de mínima  
confusión

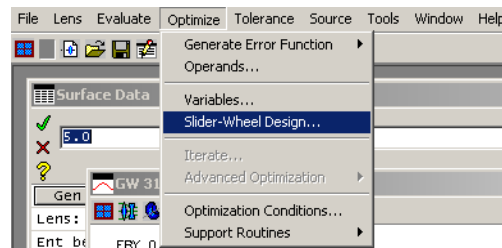
Se observa un apreciable incremento de la aberración esférica (AE). Cómo vemos la AE depende de la forma de la lente.

En las figuras anteriores se muestra un haz de rayos paralelo al eje óptico y cómo es refractado por la lente. Los rayos cercanos al eje se cortan cerca del foco paraxial, mientras que los que inciden cerca del borde lo hacen bastante más lejos. El plano donde la sección transversal del haz es mínima es conocido como el **círculo de mínima confusión**.

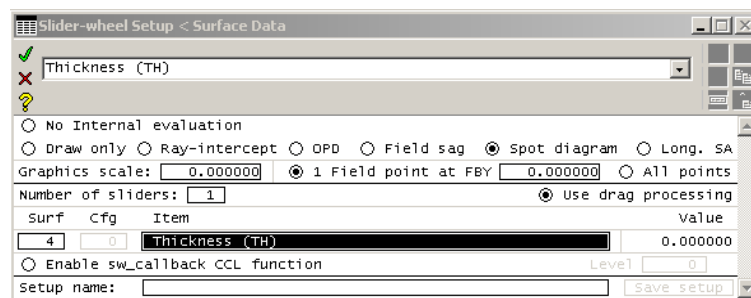
Vamos a describir cómo emplear barras de desplazamiento para ver la forma de la mancha de luz que se obtendría sobre una pantalla conforme esta se desplaza alrededor del plano imagen paraxial.

### “Slider Análisis”

Elige "Optimize>> Slider-wheel design..." de la barra principal de herramientas del OSLO.



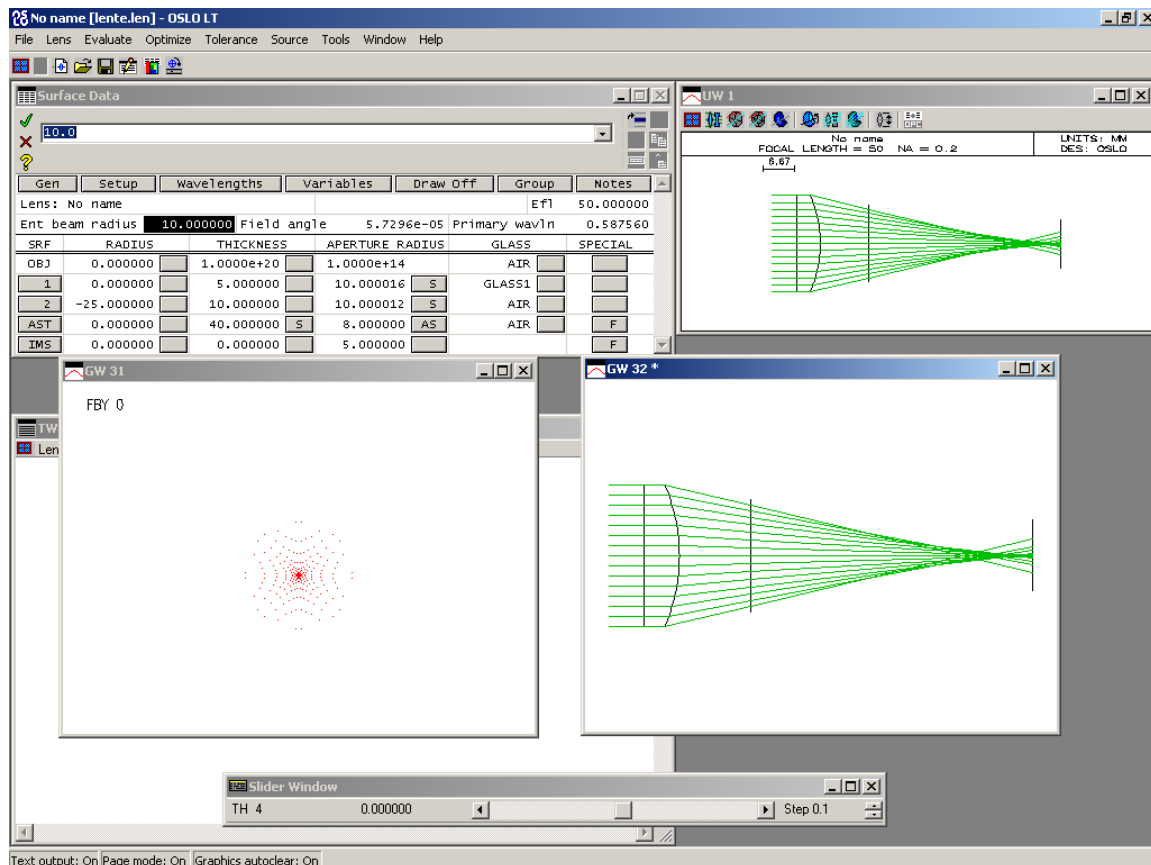
- 1) Inicialmente, deja las opciones como se muestran en la figura de abajo.
- 2) Haz clic en "Spot diagram"
- 3) Deja el "Graphics scale" to 0.0 (esto significa que el programa elige la escala del gráfico automáticamente).
- 4) Deja "1 Field point at FBY" en 0.0 (esto significa que el diagrama de puntos se crea a partir de los rayos que proceden del pie del objeto).
- 5) Cambia el número de barras "sliders" a 1
- 6) Pon 4 en la columna "Surfs", y elige el ítem "Thickness (TH)" (de esta forma al mover la barra lo que estamos haciendo es modificar la posición de la superficie 4, el plano imagen).



Cierra la ventana

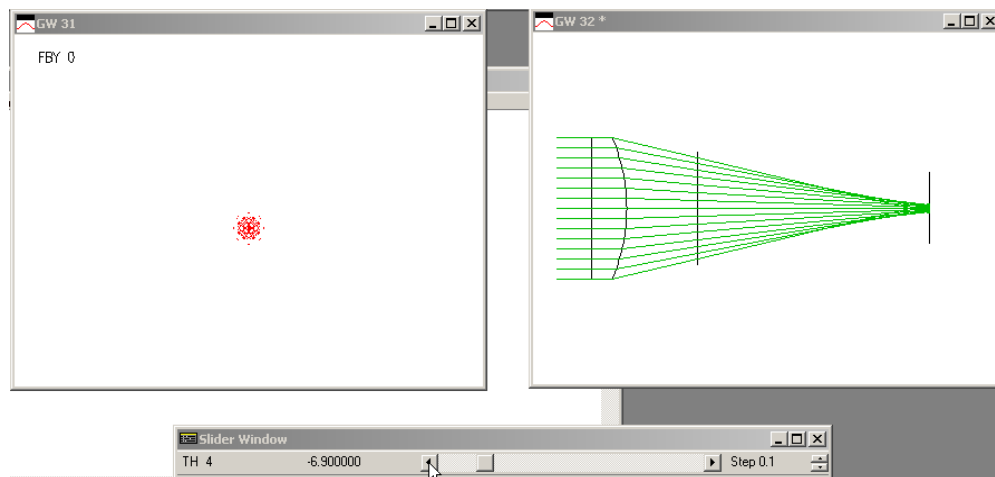
Ahora, deben aparecer en tu pantalla una barra de desplazamiento y dos ventanas de gráficos adicionales (GW 31 & GW 32).

Mueve las ventanas "GW 31" and "GW32" y la barra de desplazamiento de forma que queden de manera similar a la de la figura:



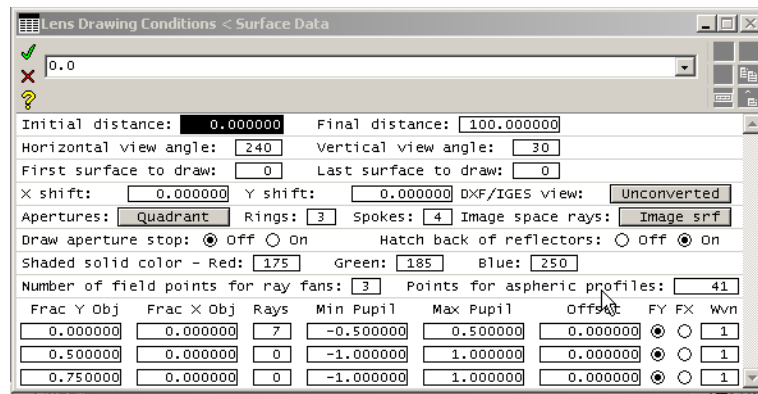
Prueba a jugar con la barra de desplazamiento y observa cómo, automáticamente, se actualizan las dos ventanas de gráficos.

Observa cómo el tamaño del diagrama de puntos es mínimo en el círculo de mínima confusión.

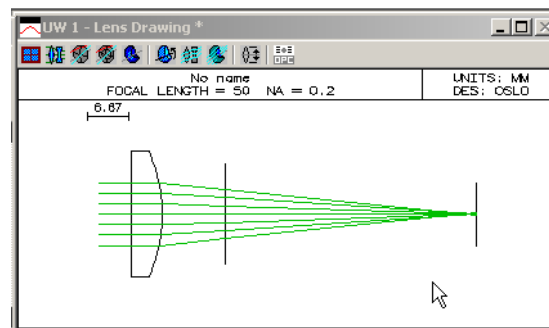


Después de realizar todas las pruebas que quieras, cierra las ventas GW31 y 32, la barra y vuelve a poner el valor de TH(4) a 0.

La AE depende fuertemente de la abertura. Esto se puede observar en la siguiente sección: Abre “Edit lens drawing conditions” y realiza las siguientes modificaciones:



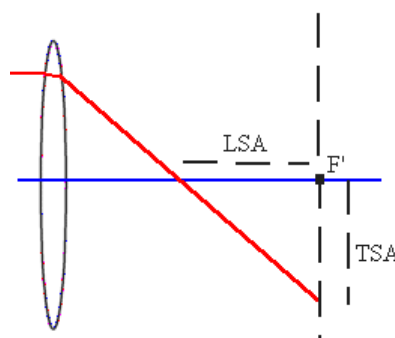
Cambia “Min and Maxi Pupil” a -0.5 and 0.5, esto es, estas limitando el dibujo a los rayos que cruzan el sistema ocupando la mitad de la apertura. Se aprecia una considerable reducción de la AE.



Resetea “Edit lens drawing conditions” a los valores anteriores.

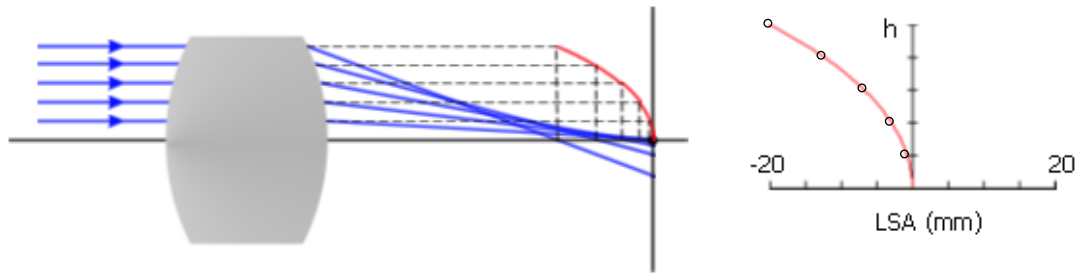
## Representación de la Aberración Esférica

La figura muestra cómo se define cuantitativamente la AE para un rayo paralelo y alejado del eje óptico en un sistema óptico dado.



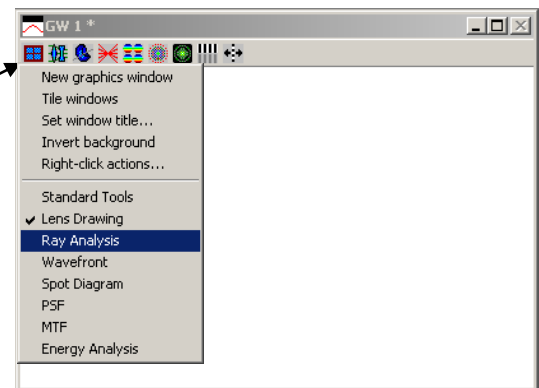
La distancia entre el plano focal paraxial y el punto de corte del rayo con el eje óptico se denomina AE longitudinal (LSA en inglés). La distancia entre el punto de corte del rayo y el eje óptico en el plano focal paraxial es la AE transversal (TSA).

Para representar la AE longitudinal. Esta representación se construye dibujando la AEL como función de la altura de incidencia del rayo considerado. Si un conjunto de rayos con, por ejemplo, alturas iguales a un 20%, 40%, 60%, 80%, y 100% de la abertura máxima, se obtiene un conjunto de valores de la AEL, pudiéndose construir una gráfica como la siguiente:

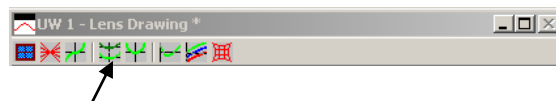


Ahora vamos a construir una de estas gráficas, en concreto para la lente plano-cóncava anterior.

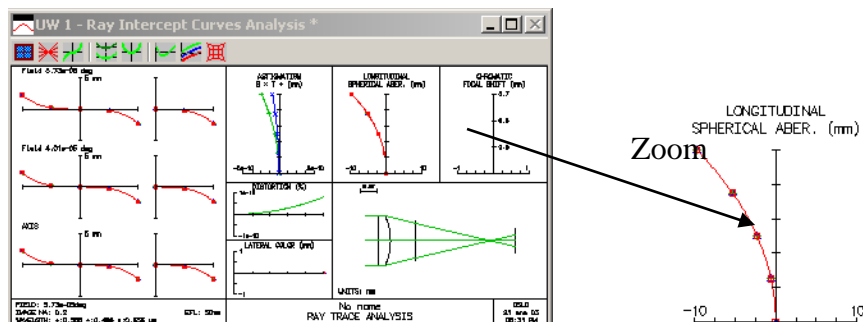
Primero presiona el botón “Setup window/toolbar” de la ventana de gráficos y selecciona la opción “Ray Analysis”.



La barra de herramientas cambia a la siguiente::

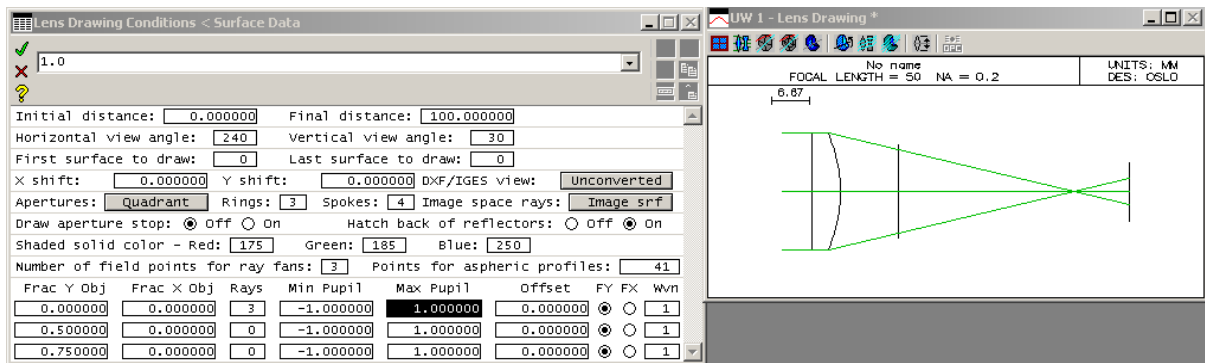


Y entonces haz clic en el botón “RIC Report Graphics”

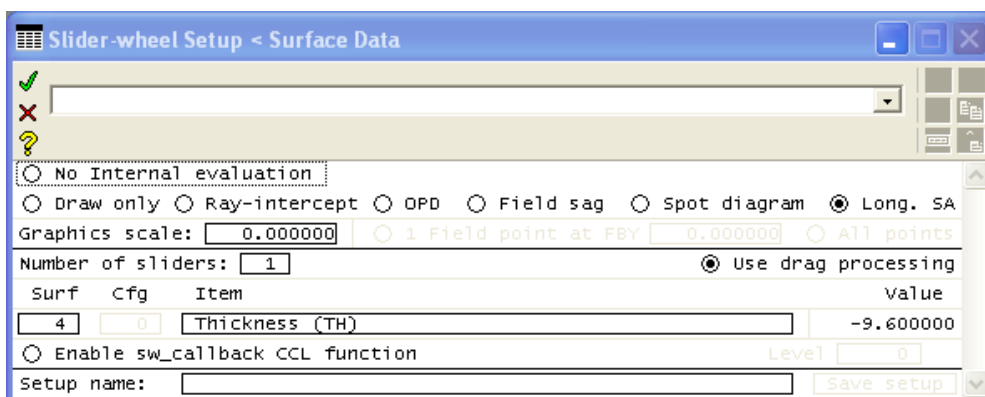


Una forma de obtener los valores de esta curva es la siguiente:

Vuelve a ejecutar “Edit lens drawing conditions” y selecciona dibujar sólo tres rayos que proceden del pie del objeto y que cruzan el sistema por el máximo, el mínimo y el centro de la pupila. Esto es, cambia los valores por los siguientes:

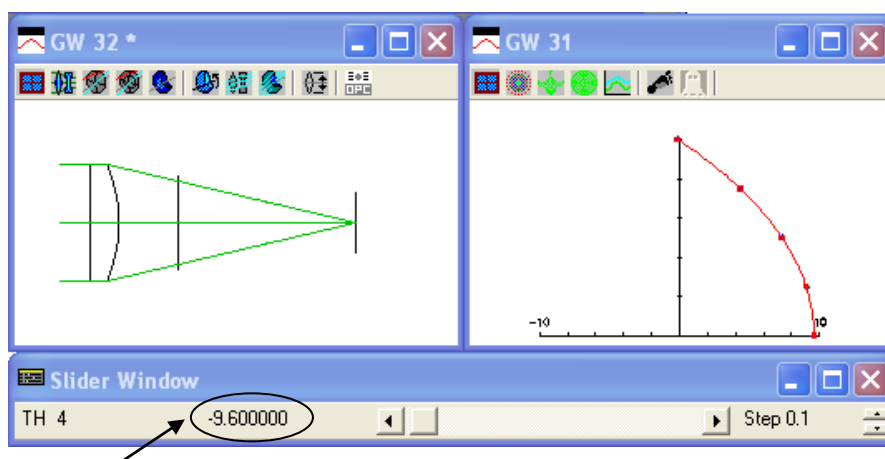


Ahora creamos un proceso interactivo, similar al utilizado para la observación del círculo de mínima confusión, pero ahora seleccionamos, en vez de Spot diagram, Long. SA:



Cierra la ventana

Ahora, deben aparecer en tu pantalla una barra de desplazamiento y dos ventanas de gráficos adicionales. Desplaza la barra hasta hacer coincidir la posición del plano imagen con el punto de corte de los rayos marginales.

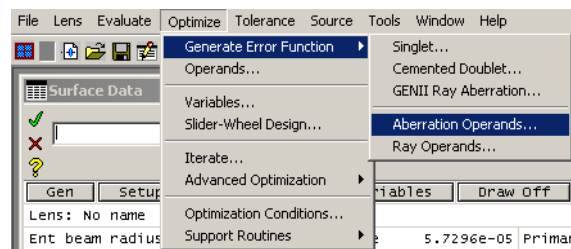


De esta forma, la distancia que hemos desplazado el plano de observación es directamente la AEL para rayos que inciden a la máxima distancia del eje. En este caso el valor es -9.6mm.

## Optimización

La AE se puede reducir igualando la refracción en cada una de las caras de la lente. Esto se realiza variando la forma de la lente, mientras que se mantiene constante el índice de refracción, el espesor y la focal de la lente. Solo los radios de curvatura de la lente se modifican. Este proceso es denominado “bending” la lente (doblado de la lente).

Esta parte de la práctica se centra en una pequeña tarea en la que optimizaremos nuestra lente. Definiremos una función de error que hace que la focal de la lente sea exactamente 50 mm y que al mismo tiempo minimiza la aberración esférica. Nos basamos en el proceso comentado anteriormente (bending lens).



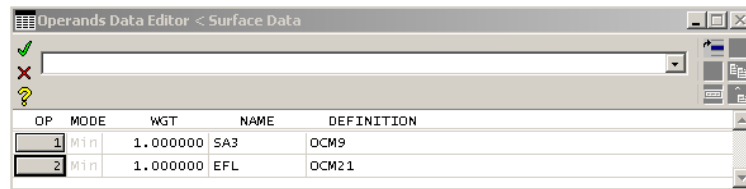
Primero selecciona "Optimize>>Generate Error Function>>Aberration Operands..." del menú principal.

Operands Data Editor < Surface Data

OP	MODE	WGT	NAME	DEFINITION
1	M1n	1.000000	PY	OCM1
2	M1n	1.000000	PU	OCM2
3	M1n	1.000000	PYC	OCM3
4	M1n	1.000000	PUC	OCM4
5	M1n	1.000000	PAC	OCM5
6	M1n	1.000000	PLC	OCM6
7	M1n	1.000000	SAC	OCM7
8	M1n	1.000000	SLC	OCM8
9	M1n	1.000000	SA3	OCM9
10	M1n	1.000000	CMA3	OCM10
11	M1n	1.000000	AST3	OCM11
12	M1n	1.000000	PT23	OCM12
13	M1n	1.000000	DIS3	OCM13
14	M1n	1.000000	SA5	OCM14
15	M1n	1.000000	CMA5	OCM15
16	M1n	1.000000	AST5	OCM16
17	M1n	1.000000	PT25	OCM17
18	M1n	1.000000	DIS5	OCM18
19	M1n	1.000000	SA7	OCM19
20	M1n	1.000000	TOTAL_SPH	OCM20
21	M1n	1.000000	EFL	OCM21

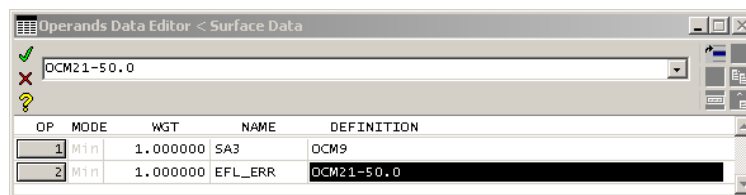
Como resultado del paso anterior, se abre una ventana con todos los operadores que podemos seleccionar para crear la función de error. La columna "NAME" identifica cada uno de los operadores. Para nosotros es suficiente saber que cada operador de la lista controla alguna característica del sistema. Por ejemplo, el operador #9 "SA3" controla la AE de 3er orden.

Para nuestras intenciones nos quedaremos con los operadores “SA3” y “EFL” (la focal del sistema). En la columna WGT pon 1 para ambos operadores.

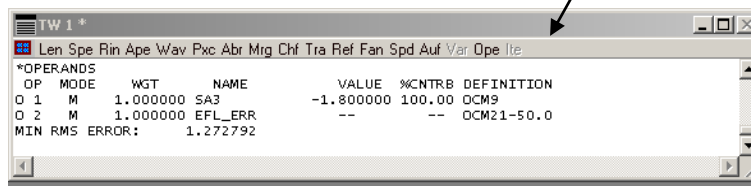


Es importante tener en cuenta que en el OSLO, el proceso de optimización trata de hacer cero todos los operadores seleccionados, es decir, el algoritmo de optimización trata de minimizar cada uno de los operadores seleccionados. Dado que el operador "EFL" es la focal de la lente, nosotros no buscamos que ésta sea cero, sino 50 mm.

Para conseguir esto, simplemente se requiere una pequeña modificación de la definición del segundo operador, pasando a ser OCM21-50. No olvides poner el valor 1.0 en los pesos (WGT) de cada operador.

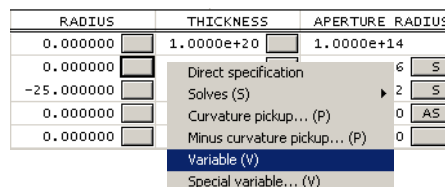


Ahora cierra esta ventana y haz clic en el botón "Ope" de la ventana de texto. Aparecerán los valores actuales de los dos operadores.



A continuación hemos de establecer los parámetros del sistema que deben ser modificados con el fin de alcanzar nuestro objetivo (la optimización del sistema). Como ya hemos comentado vamos a buscar la forma de la lente que hace mínima la AE, así pues, nuestras variables serán los radios de curvatura de la lente.

En la ventana de los datos de la superficie, haz clic en el botón "RADIUS" y elige "Variable(V)" tanto para la primera superficie como para la segunda.



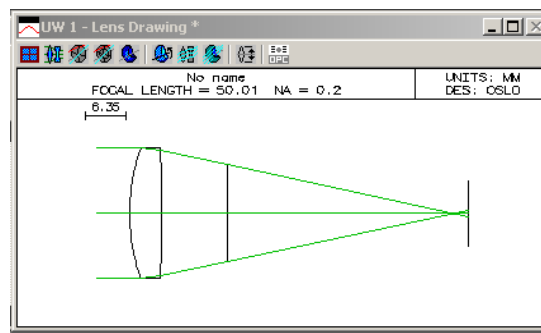
Para que empiece el proceso de optimización, haz clic en el botón "Ite" de la ventana de texto.



En la ventana de texto se pueden ir siguiendo las diversas iteraciones y cómo van cambiando los valores, hasta que llega un momento en que ya no varían más, momento en que concluye el proceso.

NBR	DAMPING	MIN ERROR	CON ERROR	PERCENT CHG.
0	1.0000e-08	1.272792	--	
1	1.0000e-08	0.781799	--	38.576091
2	1.0000e-08	0.663215	--	15.168022
3	1.0000e-04	0.439046	--	33.800317
4	0.000379	0.299996	--	31.670908
5	0.000379	0.294682	--	1.771555
6	0.000379	0.294646	--	0.012283
7	0.000234	0.294644	--	0.000424
8	0.002335	0.294644	--	1.9564e-07

Si dibujas la lente, puedes observar que su focal es prácticamente 50 mm (como buscábamos) y que la AE ha sido minimizada. Es mucho más pequeña que en la configuración inicial. También se observa que la forma óptima está muy cercana a una lente convexo-plana.



Haz clic en el botón “Abr” de la ventana de texto y observa los valores de las diferentes aberraciones, fíjate que el SA3 es -0.416634 mucho más pequeño que el valor para la configuración inicial (-1.8)

SRF	PY	PU	PI	PYC	PUC	PIC
4	8.8818e-16	-0.199973	-0.199973	5.0007e-05	1.3451e-06	1.3451e-06

SRF	PAC	SAC	PLC	SLC
SUM	--	--	--	--

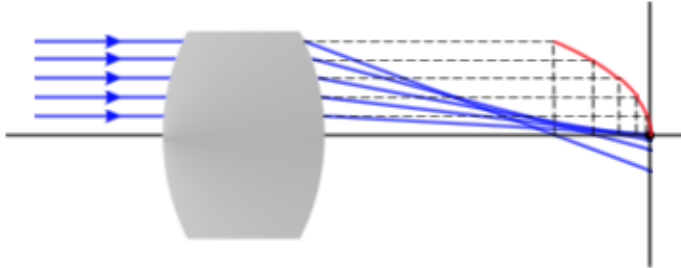
SRF	SA3	CMA3	AST3	PTZ3	DIS3
SUM	-0.416634	8.4152e-07	-6.3141e-12	-3.3636e-12	3.2363e-17

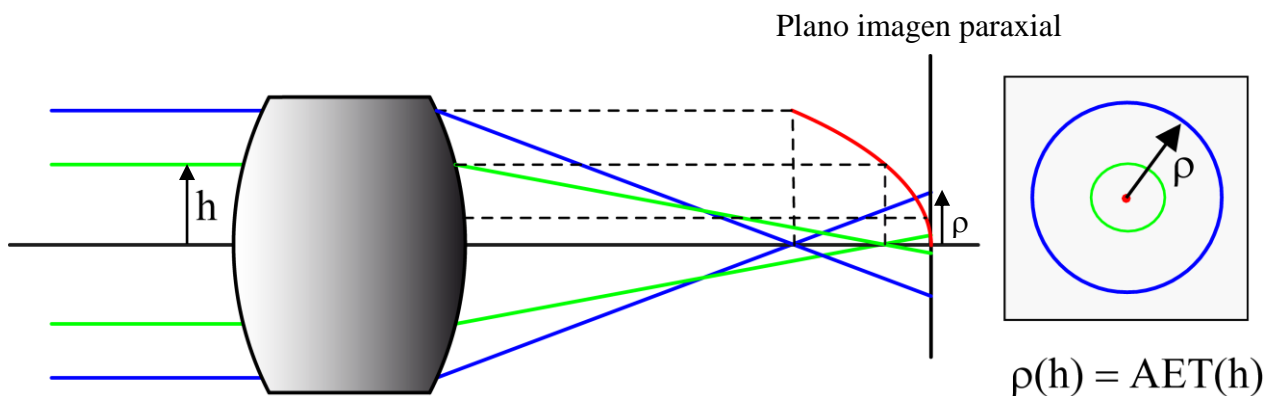
SRF	SA5	CMA5	AST5	PTZ5	DIS5	SA7
SUM	-0.043190	1.3726e-07	-6.4043e-24	4.9928e-25	2.7761e-29	-0.004983

### Estudio de la Aberración esférica. Dependencia con la apertura.

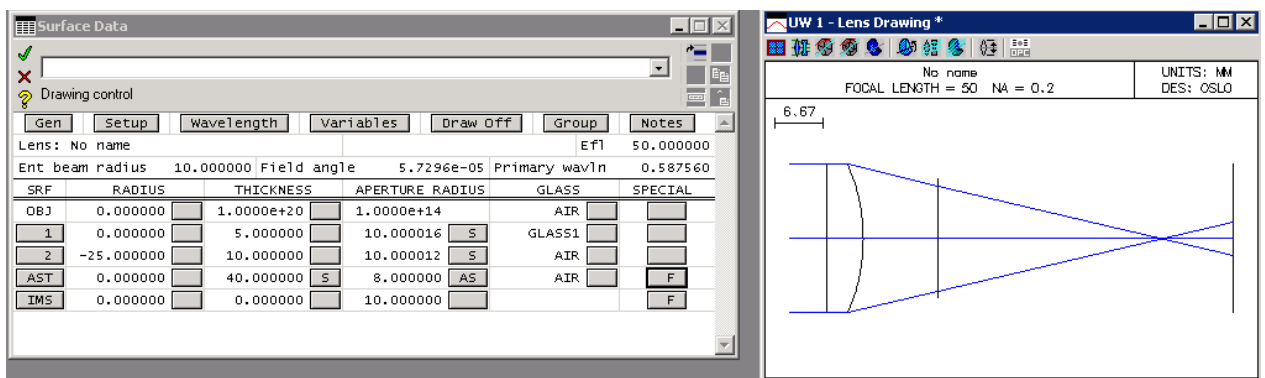
Vamos a aprovechar el OSLO para determinar la dependencia funcional de la AE transversal con la apertura. De la misma forma que representábamos la AE longitudinal en función de la apertura



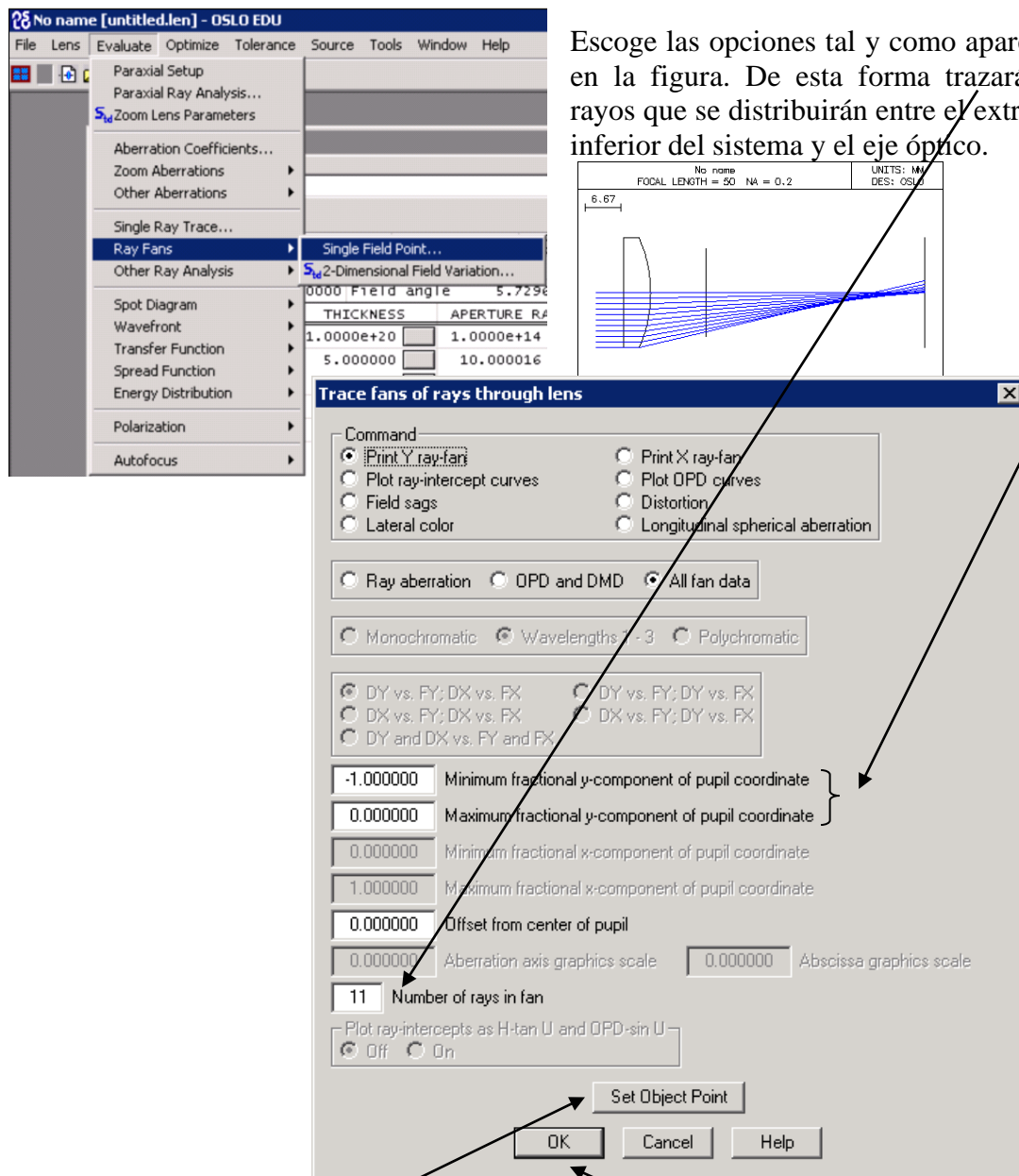
Ahora, vamos a realizar una representación de la AE transversal. Para ello, únicamente necesitamos trazar un haz de rayos procedentes del objeto (en este caso el objeto está en  $\infty$ ), determinar el punto de corte de cada uno de estos rayos sobre el plano imagen paraxial y la distancia desde este punto de corte al punto imagen paraxial, esto es, al eje. En la figura adjunta esta distancia sería  $\rho$ .



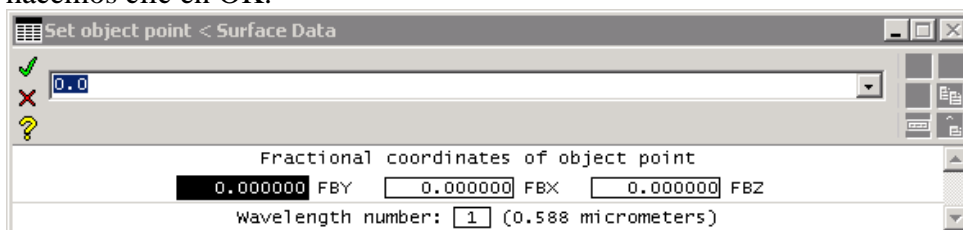
Vamos a utilizar como SO el que hemos venido analizando (lente gruesa y diafragma). Colocaremos la lente con la cara plana mirando al objeto. Es decir, partimos de la siguiente configuración:



Procedemos a pedirle al programa que nos trace un haz de rayos procedentes de un punto objeto. En el menú “Evaluate” de la barra principal de herramientas, selecciona la opción “Ray Fans”- “Single field point”. Se abrirá la siguiente ventana (Trace fans of rays through lens):



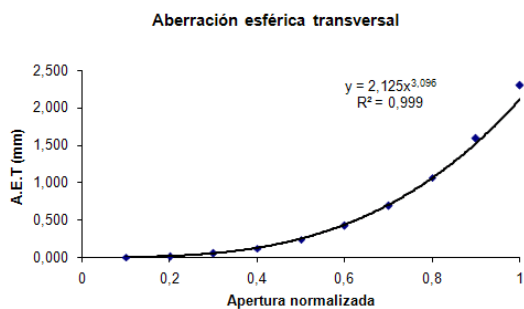
Con la pestaña “Set Object Point” seleccionaríamos el punto objeto desde el que procede el haz de rayos. Para objetos en el eje y, “FBY” = 0 implica desde el pie del objeto, “FBY” = 1 desde el extremo. Lo dejamos como en la figura. Finalmente hacemos clic en OK.



Con lo que nos debe aparecer en la venta de texto la siguiente información. En concreto nos fijaremos en las columnas “FY” y “DY”. Evidentemente, “FY” se corresponde a la altura o apertura normalizada, mientras que “DY” es precisamente la distancia entre el punto de corte de cada uno de estos rayos con el plano imagen paraxial y el punto imagen paraxial. Es decir, “DY” es directamente la AE transversal.

TW 1 *									
*TRACE FAN - FBY 0.00, FBX 0.00, FBZ 0.00									
RAY	FY	FRAC	RFS	DYA	DXA	DY	DX		
1	--	--	--	--	--	--	--		
2	-0.100000	-0.099915	0.020028	--	--	0.001804	--		
3	-0.200000	-0.199315	0.040226	--	--	0.014522	--		
4	-0.300000	-0.297664	0.060771	--	--	0.049539	--		
5	-0.400000	-0.394383	0.081857	--	--	0.119229	--		
6	-0.500000	-0.488822	0.103704	--	--	0.237587	--		
7	-0.600000	-0.580225	0.126572	--	--	0.421059	--		
8	-0.700000	-0.667680	0.150778	--	--	0.689703	--		
9	-0.800000	-0.750045	0.176732	--	--	1.068900	--		
10	-0.900000	-0.825842	0.204969	--	--	1.592037	--		
11	-1.000000	-0.893071	0.236237	--	--	2.304925	--		

Si representamos estos datos obtenemos la siguiente figura:



Para puntos objetos situados sobre el eje óptico, la única aberración presente es la AE. Para puntos objeto fuera de eje existen otras aberraciones: Coma, Astigmatismo, Curvatura de campo y Distorsión. En esta parte nos centraremos en el Coma

## Coma

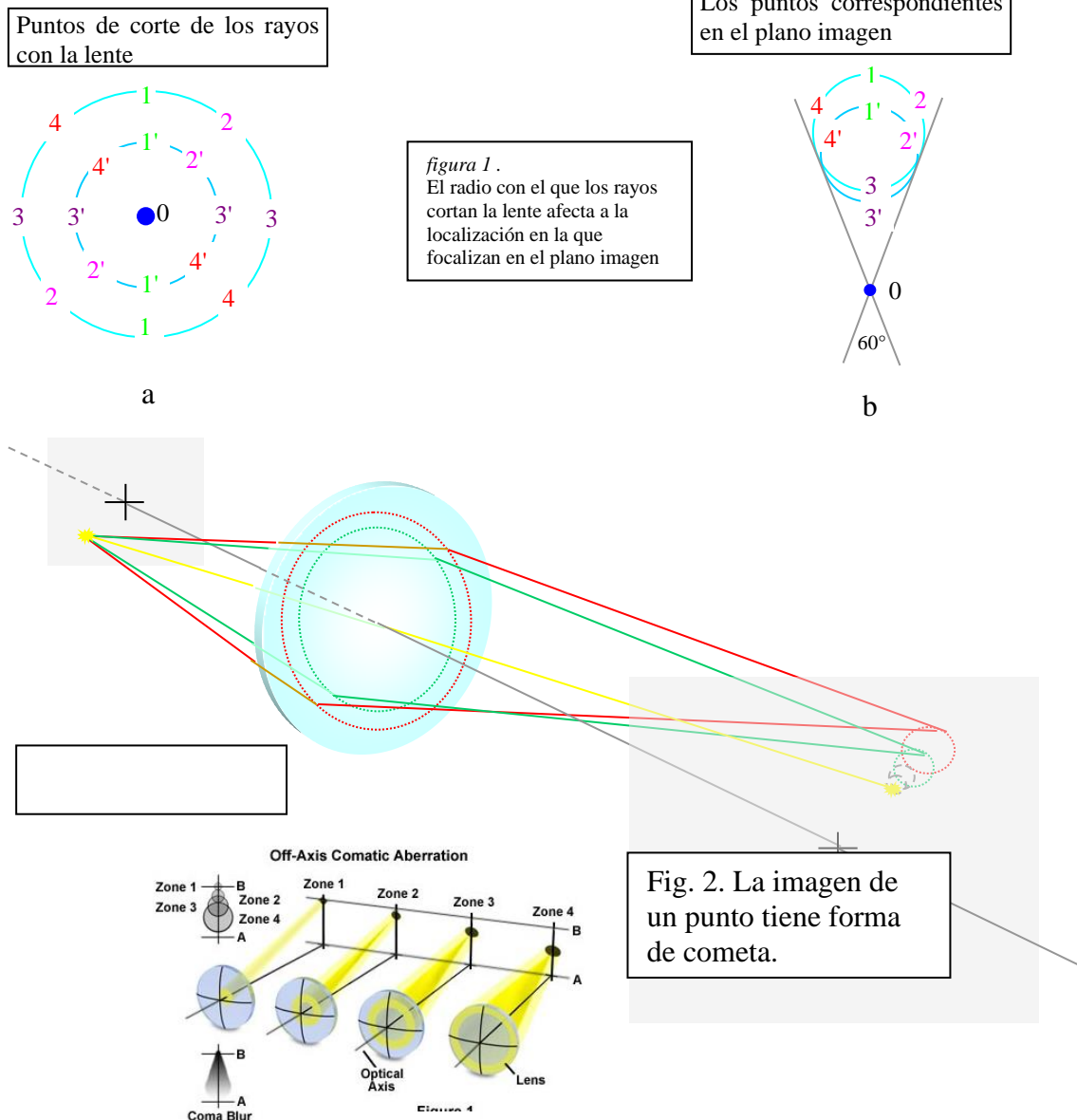
En primer lugar, un pequeño recordatorio sobre el Coma.

El Coma se debe a que el aumento lateral varía con la posición por la que el rayo entra en la lente.

Hay dos tipos de coma: positivo y negativo. El coma negativo ocurre cuando los rayos que atraviesan la lente más alejados de la región paraxial, forman la imagen más cerca del eje óptico que los que la atraviesan cerca de la región paraxial. El coma positivo es justamente lo contrario, los rayos que atraviesan la lente más alejados forman la imagen también más alejada que los que la atraviesan cerca del centro de la lente (figura 1).

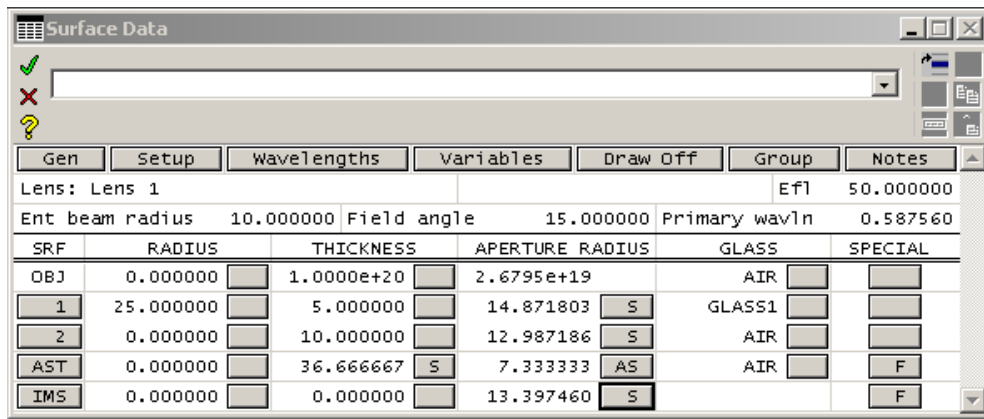
## Efecto en la imagen

Si la pupila de entrada se divide en una serie de zonas concéntricas centradas alrededor del rayo principal (Fig 1a), entonces los rayos procedentes del punto que atraviesan una de estas zonas no focalizan todos en un mismo punto. Sino que forma una imagen circular en el plano imagen paraxial (Fig 1b). La contribución de la zona marginal produce el círculo de radio mayor, zonas intermedias producen círculos más pequeños. Los números de la figura 1 sirven para ver como la imagen comática (Fig 1b) se forma.

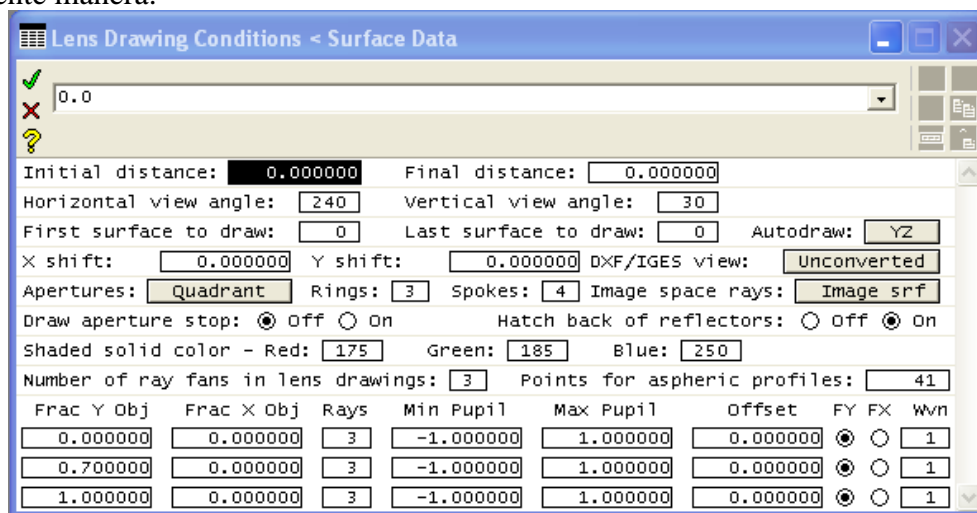


## Observación con el OSLO

Volvamos a la primera configuración (lente convexo-plana y diafragma a 10 mm) sólo que ahora consideramos haces fuera del eje “Field angle” 15°.

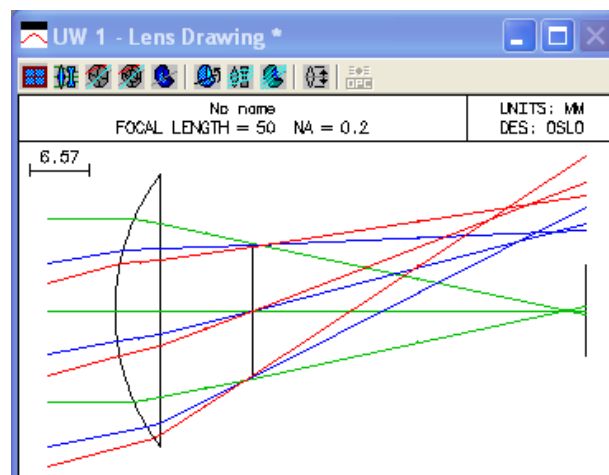


Para ver el efecto del coma sobre esta lente, configura “Lens drawing conditions” de la siguiente manera:

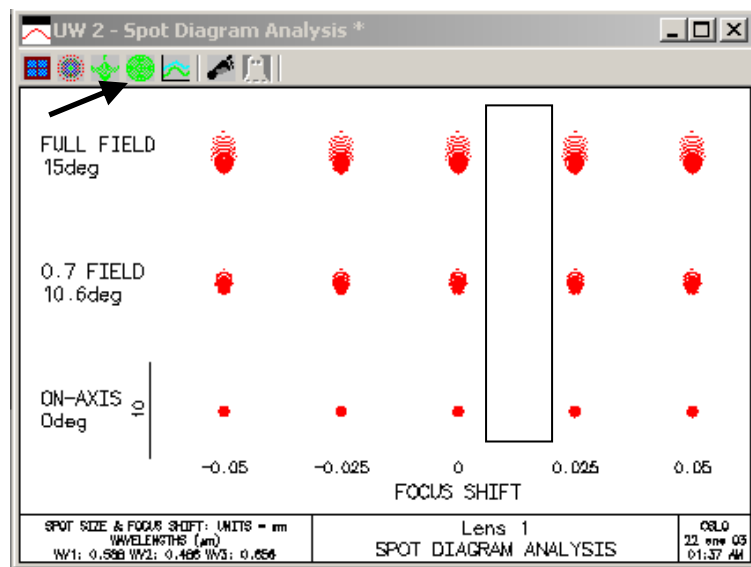


De esta forma, ahora, el programa dibujará tres haces de rayos, procedentes desde el pie del objeto, desde un 70% del tamaño (angular en este caso) y desde el extremo del objeto. Estos haces (compuestos por tres rayos) pasaran por los extremos del diafragma del sistema.

El dibujo es



La presencia del Coma se puede ver realizando un diagrama de puntos. Para ello, abre una nueva ventana de gráficos y elige como barra de herramientas “Spot diagram”, finalmente haz clic en el botón “Plot report graphics spot diagram analysis”. El resultado es un dibujo que contiene 5 grupos de tres diagramas de puntos (cada uno de estos grupos está compuesto por un diagrama de puntos de los rayos procedentes de un punto objeto del eje, de un punto objeto intermedio y del extremo del objeto). El grupo etiquetado con el 0 es el que se obtiene en la posición del plano imagen y el resto son para cuatro planos desplazados respecto a plano imagen.



## Eliminación del Coma

Ahora vamos a crear, de manera similar a como lo hemos hecho con la AE, una función de error que deja la focal de la lente en 50 mm y que a su vez, elimina el coma. (Ayuda: el operador que da el valor para el coma es el OCM10 (CMA3)).

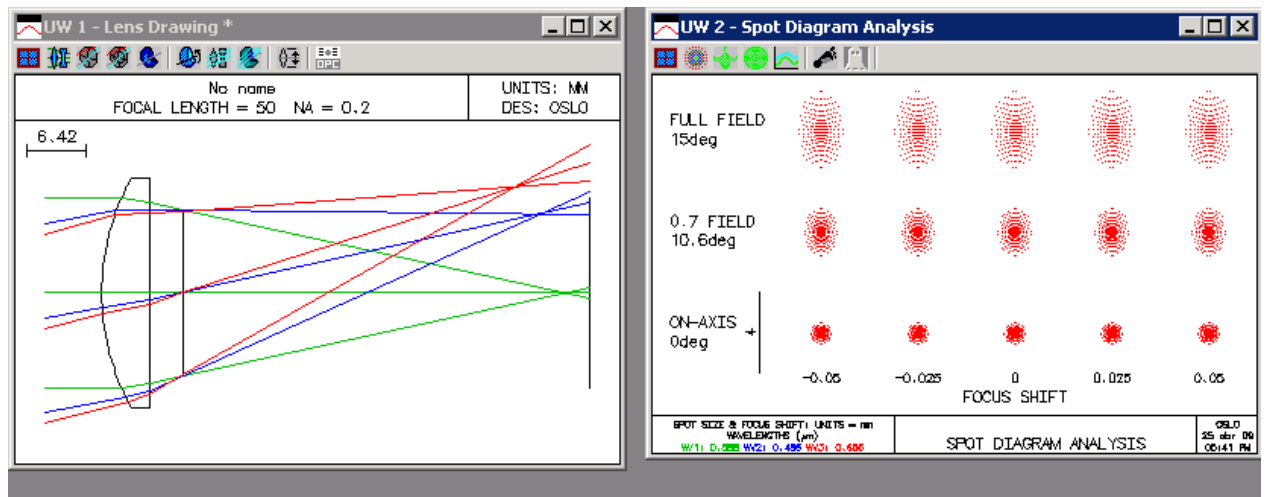
Prueba con estos dos grupos de variables:

- 1) Los dos radios de curvatura.
- 2) El radio de la primera cara de la lente, y la distancia entre la lente y el diafragma.

¿Qué opción da mejor resultado?

Guarda la configuración que da mejor resultado.

En la siguiente figura se muestra una de estas soluciones optimizadas:

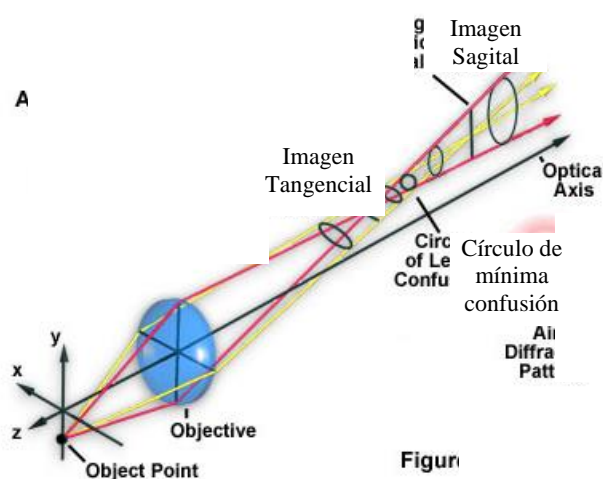


Se puede observar cómo el haz de rayos que incide con un ángulo de  $15^\circ$  (rayos procedentes del extremo del objeto situado en el infinito) se cortan en un mismo punto (esto significa que no hay coma). El diagrama de puntos muestra una mancha luminosa de forma elíptica, característica de un sistema con astigmatismo pero sin coma. También se aprecia una cierta cantidad de aberración esférica.

## Astigmatismo

Primero un breve repaso.

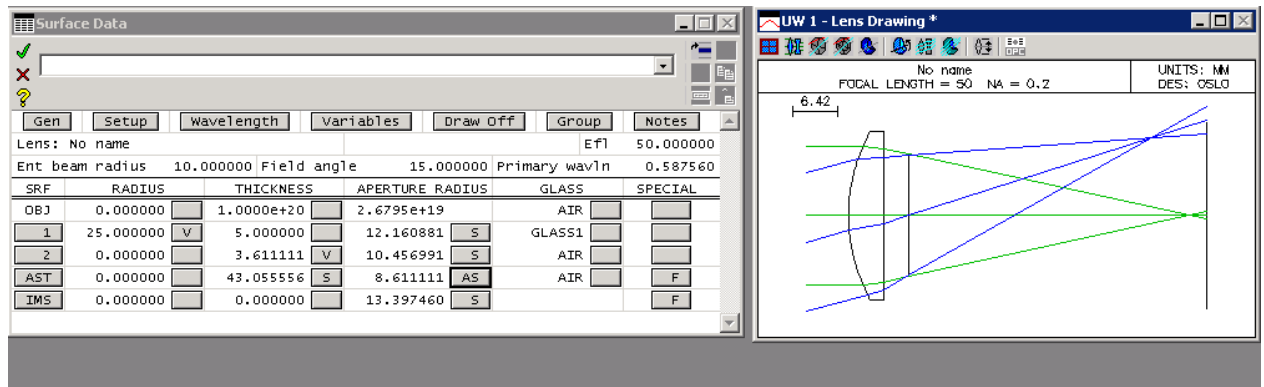
Al considerar un haz de rayos procedentes de un punto objeto fuera de eje. Definiremos un par de planos, el plano tangencial (aquel que contiene al eje y al rayo principal) y el plano sagital (perpendicular al tangencial y conteniendo el rayo principal). Debido a que el haz procede de un punto fuera de eje, los rayos contenidos en el plano tangencial y los contenidos en el sagital al llegar a la lente ven una curvatura diferente, lo que hace que focalicen en puntos diferentes. En la figura se puede observar cómo es la sección transversal de un haz astigmático conforme se propaga. Existen dos planos en los que se obtendrían dos líneas imagen (la imagen tangencial y la sagital), que corresponderían a los planos donde converge el haz tangencial y el sagital respectivamente. En el resto de los planos se obtendría una mancha de forma elíptica, excepto en el plano donde se obtendría el denominado círculo de mínima confusión donde ésta sería circular.



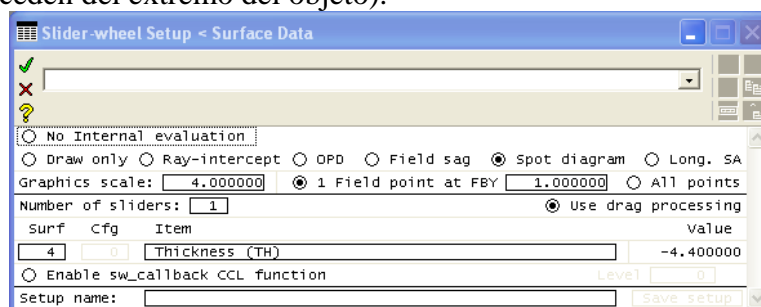


## Observación con el OSLO

Aprovechemos la configuración libre de coma que obtuvimos anteriormente y que reproducimos a continuación, para observar precisamente la forma de esta sección transversal del haz.

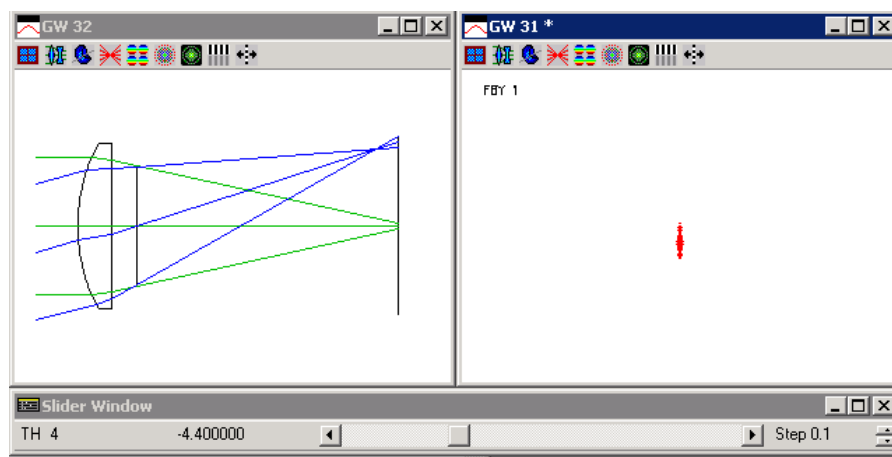


Ahora, asignamos una barra de desplazamiento a la superficie imagen (“thickness” de la superficie 4). Aprovecha para especificar la escala del diagrama de puntos con un valor, por ejemplo, de 5. Por último, es importante introducir el valor 1 en “1 Field point at FBY” (esto significa que el diagrama de puntos que nos mostrará corresponde a los rayos que proceden del extremo del objeto).

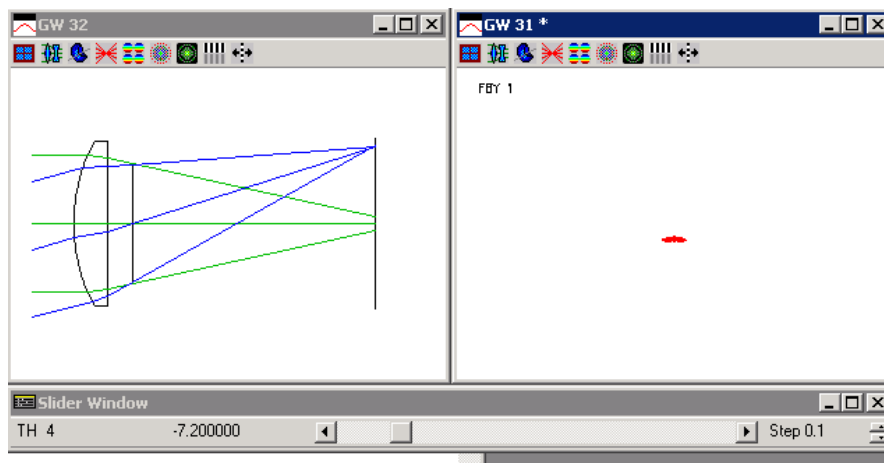


Prueba a cambiar TH[4] (la posición de la pantalla de observación), puedes ver que si la desplazas hacia la izquierda, mejora la calidad de la imagen del punto extra-axial y de hecho, puedes encontrar una posición en la que la imagen es una línea vertical (foco sagital), o también una línea horizontal (foco tangencial), estas son las conocidas focales de Sturn.

Foco sagital

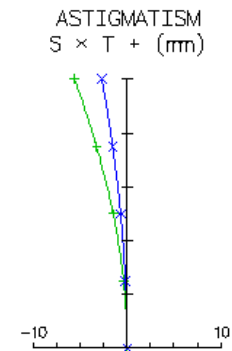
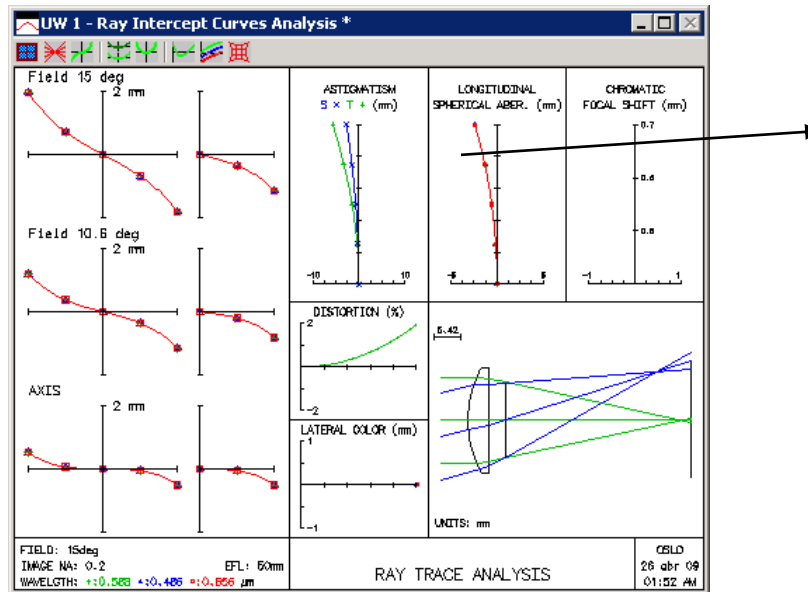


Foco Tangencial



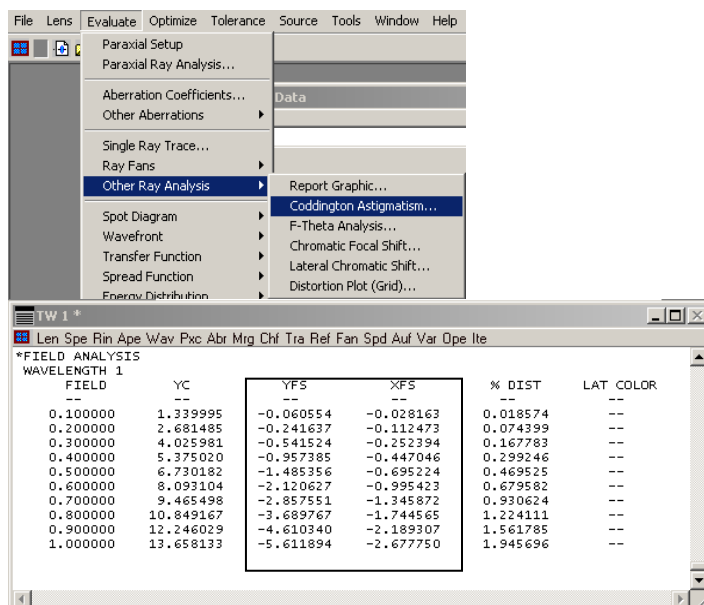
Usualmente, para representar el astigmatismo, se emplea un gráfico de tipo  $y(x)$  donde en abscisas se coloca la distancia entre el plano imagen paraxial y las imágenes tangencial y sagital (se dibuja una curva para cada una de ellas) y en ordenadas la altura del objeto o bien el ángulo de los rayos si el objeto está en el infinito.

Para la configuración de la lente libre de coma que has determinado anteriormente, se obtendría la siguiente gráfica:



La línea verde corresponde a la distancia desde la imagen tangencial a la imagen paraxial (en este caso de objeto en el infinito sería la distancia entre los focos tangencial y paraxial) mientras que la línea azul representa lo mismo pero para la imagen sagital. El eje y sería el ángulo de los rayos normalizado al valor máximo del campo (recuerda que en este caso este valor era 15°).

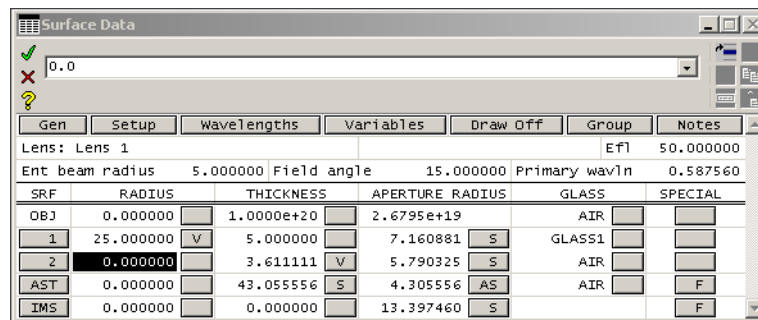
Los datos de estas curvas se pueden obtener ejecutando la opción “Coddington Astigmatism...”, y los resultados son: (YFS distancia entre el foco tangencial y el paraxial, XFS lo mismo pero para el foco sagital). Compara estos valores con la figura.



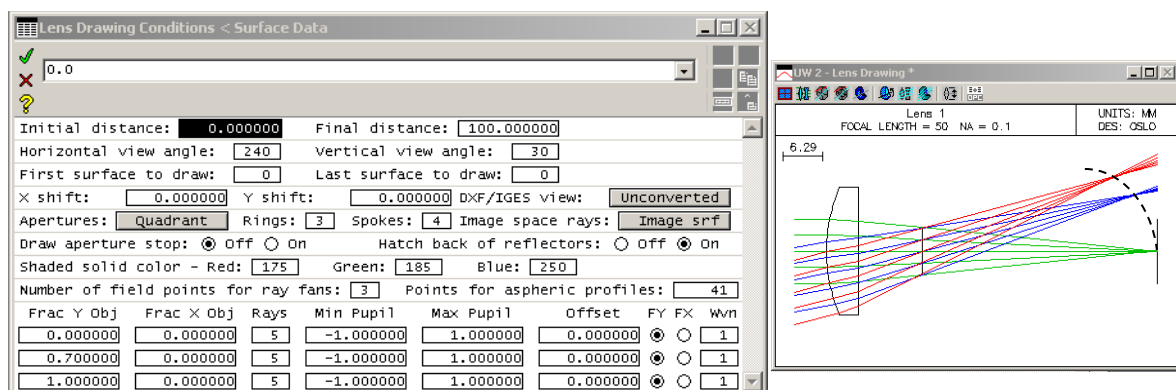
## Curvatura de campo

Cuando formamos la imagen de un objeto plano con una lente, por lo general no obtendremos una imagen plana, sino que esta se formara sobre una superficie curvada.

Para poder apreciar este efecto, en la lente con la que estamos trabajando cambia el “Ent beam radius” a 5 (para que se vea mejor el efecto).



Después configura las “Lens Drawing conditions” con las siguientes opciones y dibuja la lente, debes obtener un dibujo similar al siguiente:



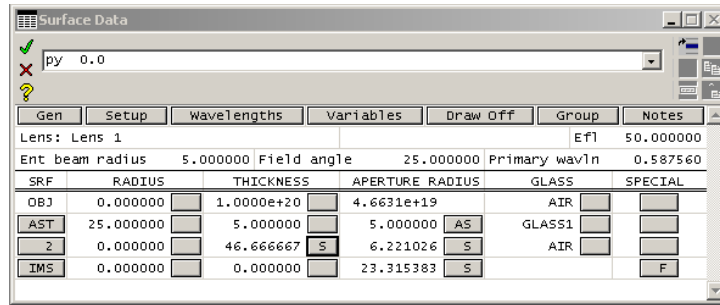
Puedes ver como la imagen de los diferentes haces de rayos procedentes del plano objeto (que está en el infinito) focalizan en una superficie curvada, este fenómeno es lo que se conoce como curvatura de campo. Si el sistema fuese perfecto, todos focalizarían sobre el plano imagen paraxial.

## Distorsión

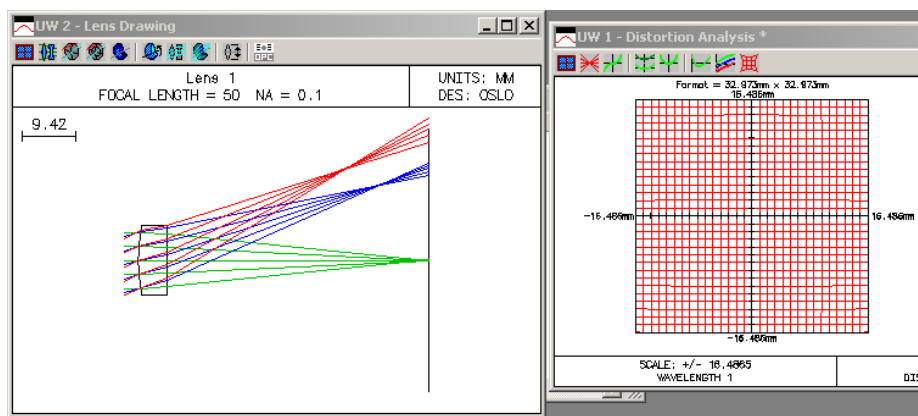
Finalmente vamos a ver la Distorsión. Esta aberración está, al igual que la curvatura de campo, asociada a objetos extensos. Aparece debido a que el aumento (que idealmente debería ser constante) es función de la distancia al eje.

Veamos cómo una lente simple está libre de distorsión, y cómo la introducción de un diafragma (antes o después de la lente) provoca la aparición de la distorsión.

Comencemos con la siguiente configuración:

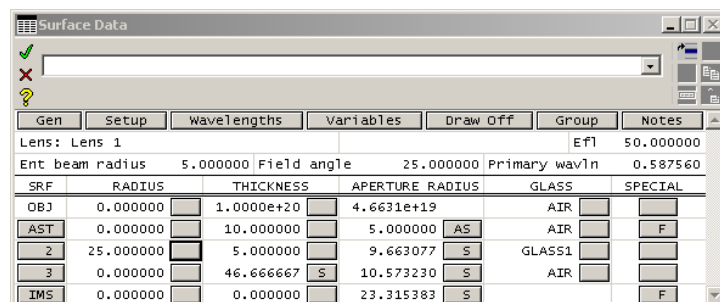


Abre una nueva ventana de gráficos y selecciona la barra de gráficos “Ray analysis” y presiona el botón “Dispersion analysis”. El resultado muestra la imagen de una red cuadrada perfecta.

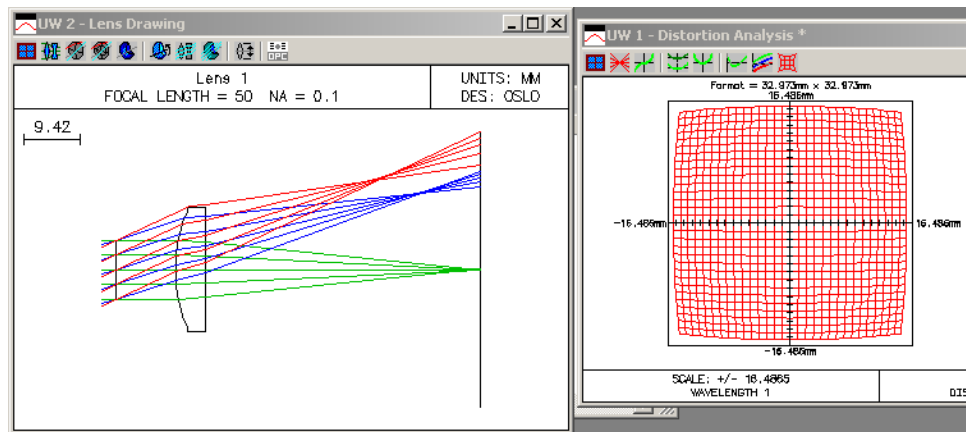


En este caso donde el sistema es una lente simple no se observa distorsión, la imagen sigue siendo una red cuadrada perfecta.

Ahora insertamos un diafragma 10 mm por delante de la lente.



En este caso se puede apreciar que la imagen de la red cuadrada perfecta es una red deformada.



Este tipo de distorsión se denomina distorsión en barril.

Finalmente considera que colocamos un diafragma 10 mm por detrás de la lente.

Surface Data						
Gen	Setup	Wavelengths	Variables	Draw Off	Group	Notes
Lens: Lens 1						
Ent beam radius 5.000000 Field angle 25.000000 Primary wavln 0.587560						Efl 50.000000
SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS	SPECIAL	
OBJ	0.000000	1.0000e+20	4.6631e+19	AIR		
1	25.000000	5.000000	13.478321	GLASS1	S	
2	0.000000	10.000000	11.025407	AIR	S	
AST	0.000000	36.666667	3.666667	AS		F
IMS	0.000000	0.000000	23.315383	S		F

Ahora se obtiene la denominada distorsión en corsé.

