

Práctica 2: Sistema Óptico

Ruiz Muñoz, Migue Langel Caballero Almagro, Alejandro

Óptica I - Curso 2022/2023



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Índice

| | |
|--|---|
| 1. Construir un sistema de lentes (puede ser con una lente pero se valorará hacer un sistema con 2 o tres lentes) y realizar los siguientes cálculos. | 3 |
| a. Calcula la focal de la lente y la posición de los planos principales y focales. | 4 |
| b. Representa mediante el OSLO el trazado de rayos de este sistema para tres haces (uno que pasa por el extremo, un segundo a la mitad mm y un tercero a 0,5 mm). | 5 |
| c. Utiliza el setup como calculadora paraxial y calcula la posición de la imagen y el aumento para una posición del objeto distinto del infinito. | 6 |
| d. Estudia las aberraciones de este sistema AEL (gráfica) siguiendo los pasos de la práctica. | 6 |
| e. Calcula cuál tendría que ser el radio de una o varias de las superficies de una de las lentes para que se minimice la aberración esférica y la focal sea la mitad del valor que se obtenía. | 8 |

1. Construir un sistema de lentes (puede ser con una lente pero se valorará hacer un sistema con 2 o tres lentes) y realizar los siguientes cálculos.

En nuestro caso el sistema constará de 3 lentes, un doblete pegado, una lente convexa-cóncava y otra biconvexa. Por lo tanto, en total tendremos 7 superficies, cuyas características vienen reflejadas en la siguiente tabla.

| | Doblete pegado | | | Convexo - Concavo | | Biconvexo | |
|----------|----------------|--------------|--------------|-------------------|--------------|--------------|--------------|
| | Superficie 1 | Superficie 2 | Superficie 3 | Superficie 1 | Superficie 2 | Superficie 1 | Superficie 2 |
| Radio | -46 | -36 | 108 | 70 | 50 | 21 | -21 |
| e | 2,5 | 4,1 | 10 | 10 | 15 | 12 | 45 |
| Diámetro | 25 | 25 | 25 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| n | 1.67 | 1.5 | 1 | 1.45 | 1 | 1.52 | 1 |

Tabla 1: Datos de las superficies (en milímetros)

Cabe decir que e es la distancia que hay hasta la siguiente superficie y que n es el índice de refracción que hay a la derecha de cada superficie. El sistema que obtenemos es el siguiente. A continuación veremos como luce el sistema que hemos descrito en la tabla anterior.

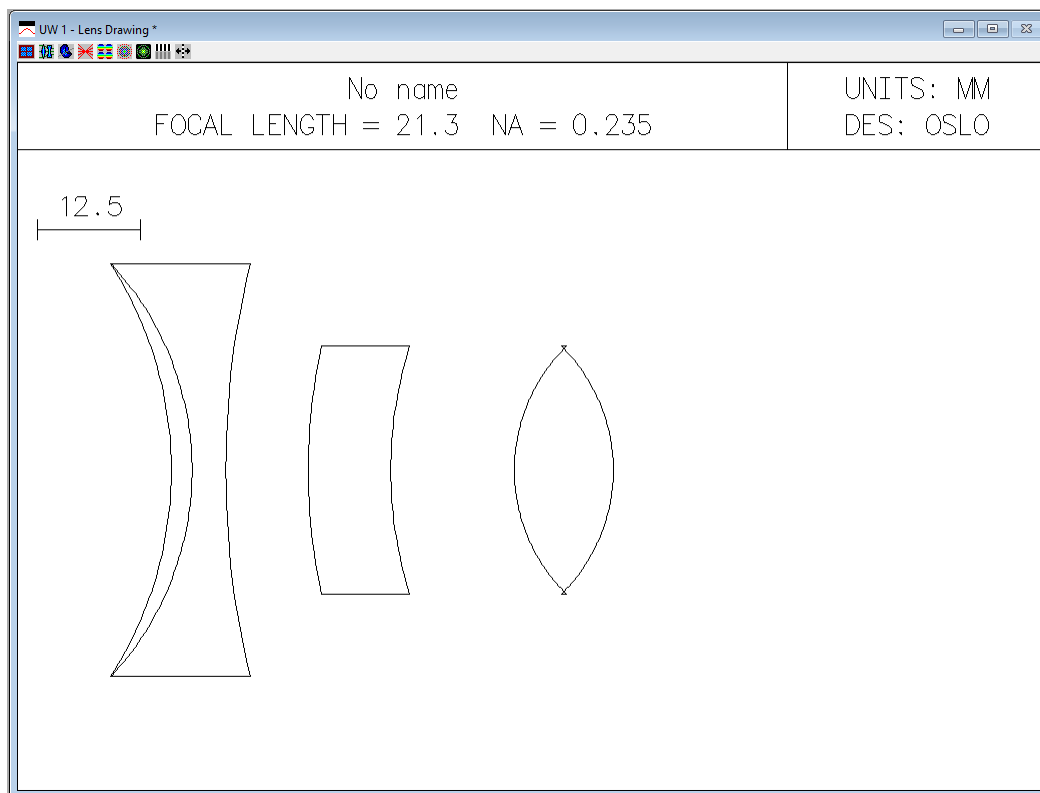


Figura 1: Representación del sistema de lentes que usaremos en esta práctica.

Una vez tenemos el sistema, pasamos a responder las cuestiones.

a. Calcula la focal de la lente y la posición de los planos principales y focales.

La focal de la lente nos la da el propio programa en la tabla con las lentes,

| SRF | RADIUS | THICKNESS | APERTURE RADIUS | GLASS | SPECIAL |
|-----|------------|------------|-----------------|--------|---------|
| OBJ | 0.000000 | 1.0000e+20 | 1.0000e+14 | AIR | |
| 1 | -46.000000 | 2.500000 | 25.000000 | GLASS1 | |
| 2 | -36.700000 | 4.100000 | 25.000000 | GLASS2 | |
| 3 | 108.000000 | 10.000000 | 25.000000 | AIR | |
| 4 | 70.000000 | 10.000000 | 15.000000 | GLASS4 | |
| 5 | 50.000000 | 15.000000 | 15.000000 | AIR | |
| 6 | 21.000000 | 12.000000 | 15.000000 | GLASS6 | |
| 7 | -21.000000 | 45.000000 | 15.000000 | AIR | |
| AST | 0.000000 | 0.000000 | 2.222186 | AS | |
| IMS | 0.000000 | 0.000000 | 2.222186 | S | |

Figura 2: Datos de las lentes

El dato de la focal del sistema viene dado como Efl (en la figura 2), por lo que la focal del sistema es $f = 21,3$ mm. Lo otro que nos preguntan son las posiciones de los planos principales y focales. Esto lo podemos mirar en *paraxialsetup* en la figura 3,

```
*PARAXIAL SETUP OF LENS

APERTURE
Entrance beam radius: * 5.000000
Object num. aperture: 5.0000e-20
Image num. aperture: 0.234723
Image axial ray slope: -0.234723
F-number: 2.130174
Working F-number: 2.130174

FIELD
Field angle: * 5.7296e-05
Gaussian image height: 2.1302e-05
Object height: -1.0000e+14
Chief ray ims height: 2.7105e-20

CONJUGATES
Object distance: 1.0000e+20
Gaussian image dist.: -9.467286
Srf 1 to prin. pt. 1: 32.740457
Srf 8 to prin. pt. 2: -30.769030
Overall lens length: 98.600000
Total track length: 1.0000e+20
Paraxial magnification: -2.1302e-19
Srf 8 to image srf: --

OTHER DATA
Entrance pupil radius: 5.000000
Exit pupil radius: 2.222186
Srf 1 to entrance pup.: -36.491003
Srf 8 to exit pupil: 1.2046e-14
Lagrange invariant: -5.0000e-06
Petzval radius: -67.159712
Effective focal length: 21.301744

SPOT DIAGRAMS
Aperture divisions: 17.030000
Gaussian apod. spec.: Off
X 1/e^2 entr. irr.: 1.000000
Y 1/e^2 entr. irr.: 1.000000
```

Figura 3: Datos paraxiales del sistema óptico

En esta figura vemos que la posición de los planos principales son, 32,74 mm a la derecha de la primera superficie para el plano principal objeto y 30,77 mm a la izquierda de la última superficie para el plano imagen, esto lo podemos ver donde pone 'Srf 1 to prin. pt 1' y 'Srf 8 to prin. pt 2'. A partir de estos, teniendo en cuenta que la focal del sistema es $f_{Ef} = 21,3$ mm, podemos calcular los planos focales, estos serán:

$$F = H - f_{Ef} = 32,74 - 21,3 = 11,44 \quad ; \quad F' = H' + f_{Ef} = -30,76 + 21,3 = -9,46$$

Con estos resultados sabemos que el plano focal objeto está a la derecha de la primera superficie a 11,44 mm y que el plano focal imagen está a 9,46 mm a la izquierda de la última superficie.

- b. Representa mediante el OSLO el trazado de rayos de este sistema para tres haces (uno que pasa por el extremo, un segundo a la mitad mm y un tercero a 0,5 mm).

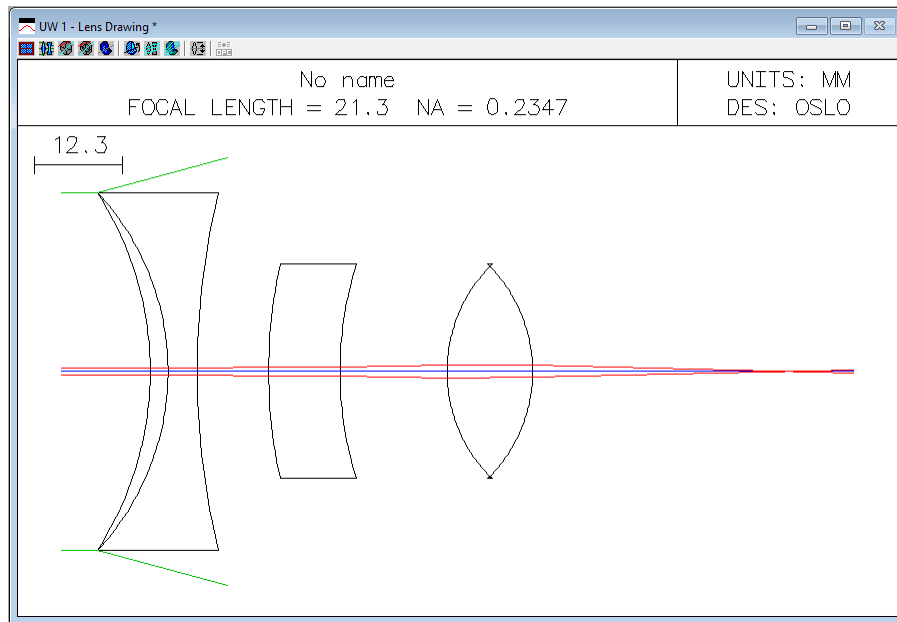


Figura 4: Sistema óptico con los 3 haces pedidos

Para obtener la figura 4 lo que hemos hecho ha sido entrar en *edit lens drawing conditions* y ajustar los rayos para que pasen por donde queramos.

Podemos observar en la figura 4 que el plano focal imagen no se corresponde demasiado con el lugar donde se forma la imagen con los rayos. Esto es debido a que, como veremos en los apartados d) y e), la aberración en este sistema de lentes es bastante grande.

- c. Utiliza el setup como calculadora paraxial y calcula la posición de la imagen y el aumento para una posición del objeto distinto del infinito.

*PARAXIAL SETUP OF LENS

| | | |
|-----------------------------------|-------------|--|
| APERTURE | | |
| Entrance beam radius: * | 5.000000 | Image axial ray slope: -0.288421 |
| Object num. aperture: | 0.099504 | F-number: 7.884281 |
| Image num. aperture: | 0.286990 | Working F-number: 1.742223 |
| FIELD | | |
| Field angle: * | 0.000212 | Object height: -5.0000e-05 |
| Gaussian image height: | 1.7336e-05 | Chief ray ims height: -5.4210e-20 |
| CONJUGATES | | |
| Object distance: | 50.000000 | Srf 1 to prin. pt. 1: 32.740457 |
| Gaussian image dist.: | -2.081644 | Srf 8 to prin. pt. 2: -30.769030 |
| Overall lens length: | 98.600000 | Total track length: 148.600000 |
| Paraxial magnification: | -0.346715 | Srf 8 to image srf: -- |
| OTHER DATA | | |
| Entrance pupil radius: | 1.350900 | Srf 1 to entrance pup.: -36.491003 |
| Exit pupil radius: | 0.600390 | Srf 8 to exit pupil: -6.5094e-15 |
| Lagrange invariant: | -5.0000e-06 | Petzval radius: -67.159712 |
| Effective focal length: | 21.301744 | |
| SPOT DIAGRAMS | | |
| Aperture divisions: | 17.030000 | Gaussian apod. spec.: Off |
| X 1/e ² entr. irradi.: | 1.000000 | Y 1/e ² entr. irradi.: 1.000000 |

Figura 5: Setup

Cambiando la posición del objeto a 50 mm de la primera superficie podemos observar en el 'Paraxial Setup' que la posición de la imagen ('Gaussian image dist.') es de 2.08 mm a la izquierda de la última superficie. También podemos ver que el aumento de la lente ('Paraxial magnification') es de -0.346, por lo que la imagen se verá menor que el objeto e inversa a la posición de este.

- d. Estudia las aberraciones de este sistema AEL (gráfica) siguiendo los pasos de la práctica.

La *AEL* es la distancia entre el plano focal paraxial y el punto de corte del rayo con el eje óptico. Lo que haremos será representar esta aberración en función de la altura de incidencia del rayo considerado. Lo haremos para alturas iguales a un 20 %, 40 %, 60 %, 80 % y 100 % de la abertura máxima obteniendo las siguientes aberraciones,

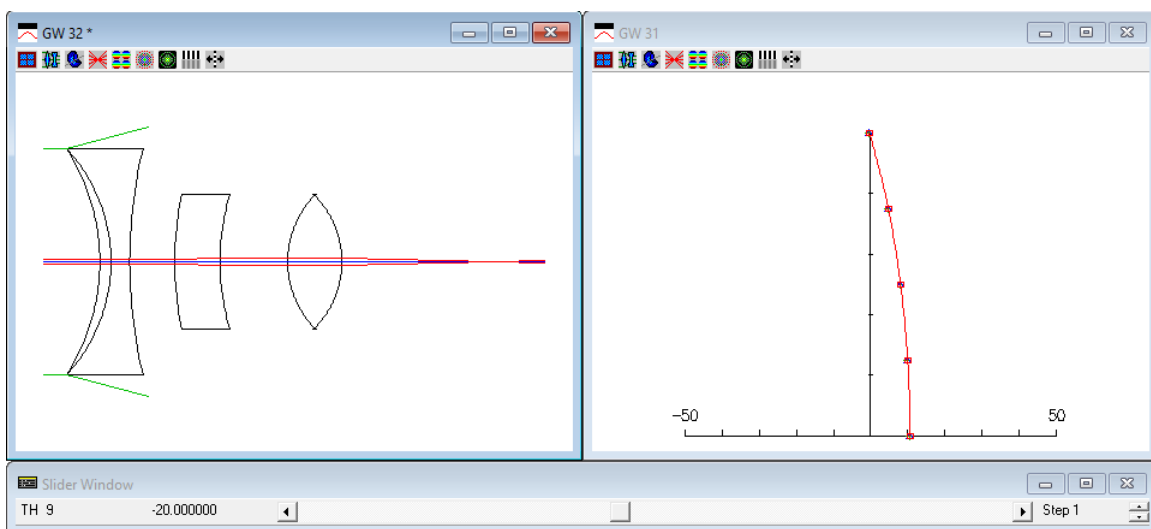


Figura 6: Aberración esférica longitudinal según la altura

podemos calcular los valores de dicha curva si ejecutamos *Edit lens drawing conditions* y seleccionamos *Long. SA*. Con esto nos aparece una barra de desplazamiento y buscamos hacer coincidir el plano con los puntos de corte para ver los

valores de AEL .

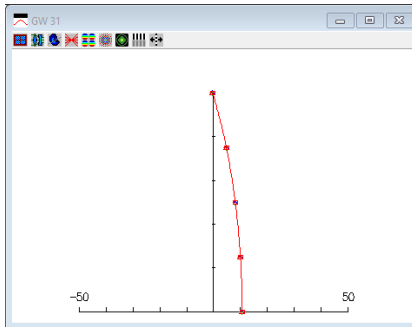


Figura 7: AEL para un 100 % de la abertura máxima

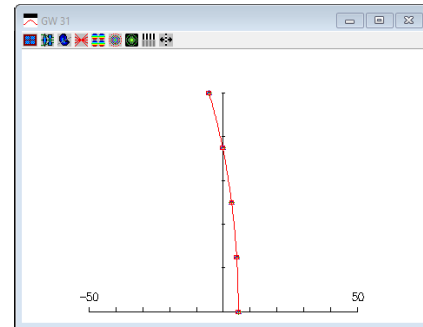


Figura 8: AEL para un 80 % de la abertura máxima

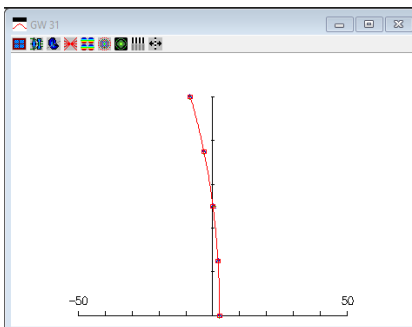


Figura 9: AEL para un 60 % de la abertura máxima

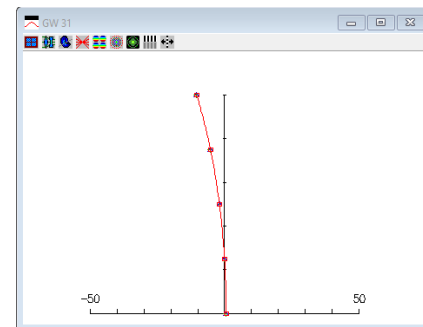


Figura 10: AEL para un 40 % de la abertura máxima

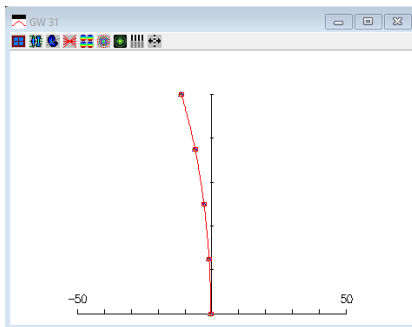


Figura 11: AEL para un 20 % de la abertura máxima

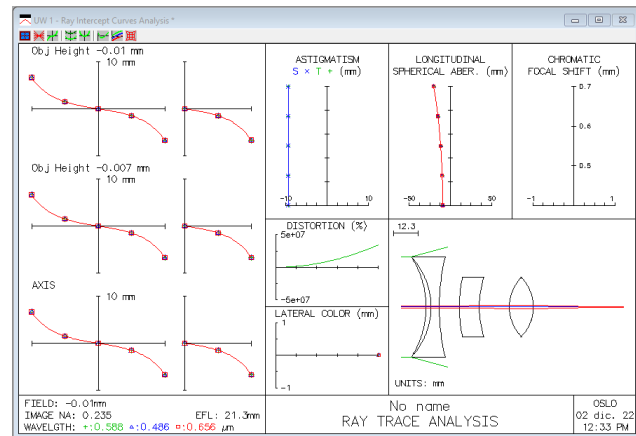


Figura 12: Resume de todas las aberraciones del sistema

En las figuras 7, 8, 9, 10 y 11 vemos cómo hemos cuadrado el plano con el punto de corte obteniendo los siguientes valores para la AEL ,

Además, en la figura 12 vemos un resumen con todas las aberraciones que presenta el sistema: AEL , astigmatismo, aberración cromática, distorsión...

| Altura (Apertura) | AEL |
|-------------------|-----|
| 100 % | -20 |
| 80 % | -15 |
| 60 % | -12 |
| 40 % | -10 |
| 20 % | -9 |

Tabla 2: *AEL* para cada altura en *mm*

- e. Calcula cuál tendría que ser el radio de una o varias de las superficies de una de las lentes para que se minimice la aberración esférica y la focal sea la mitad del valor que se obtenía.

Para minimizar la aberración esférica lo que hacemos es variar la forma de la lente. Para esto utilizaremos una opción del Oslo que nos facilita los cálculos, básicamente le diremos lo que queremos minimizar y las variables que tiene que utilizar para hacerlo.

| *OPERANDS | | | | | | |
|----------------|------|----------|-----------|-------------|--------|-------------|
| OP | MODE | WGT | NAME | VALUE | %CNTRB | DEFINITION |
| O 1 | M | -- | PY | -0.099152 | -- | OCM1 |
| O 2 | M | -- | PU | -0.234991 | -- | OCM2 |
| O 3 | M | -- | PYC | 2.0325e-05 | -- | OCM3 |
| O 4 | M | -- | PUC | -2.2583e-06 | -- | OCM4 |
| O 5 | M | -- | PAC | -- | -- | OCM5 |
| O 6 | M | -- | PLC | -- | -- | OCM6 |
| O 7 | M | -- | SAC | -- | -- | OCM7 |
| O 8 | M | -- | SLC | -- | -- | OCM8 |
| O 9 | M | 1.000000 | SA3 | -2.312189 | 4.50 | OCM9 |
| O 10 | M | -- | CMA3 | -2.7092e-05 | -- | OCM10 |
| O 11 | M | -- | AST3 | -3.1772e-10 | -- | OCM11 |
| O 12 | M | -- | PTZ3 | -7.9204e-13 | -- | OCM12 |
| O 13 | M | -- | DIS3 | -3.7536e-15 | -- | OCM13 |
| O 14 | M | -- | SA5 | -0.764963 | -- | OCM14 |
| O 15 | M | -- | CMA5 | -1.7596e-05 | -- | OCM15 |
| O 16 | M | -- | AST5 | -1.3895e-20 | -- | OCM16 |
| O 17 | M | -- | PTZ5 | -5.9625e-23 | -- | OCM17 |
| O 18 | M | -- | DIS5 | -1.6291e-25 | -- | OCM18 |
| O 19 | M | -- | SA7 | -0.297834 | -- | OCM19 |
| O 20 | M | -- | TOTAL_SPH | -3.374986 | -- | OCM20 |
| O 21 | M | 1.000000 | EFL | 10.651744 | 95.50 | OCM21-10.65 |
| MIN RMS ERROR: | | | | 7.707330 | | |

Figura 13: Pantalla con los operadores, podemos ver que $SA3 = -2,31$ y $EFL - 10,65 = 10,65$.

Para acceder a la pantalla de la figura 13 entramos en *Optimize > Generate error function > aberration operands*. En ella, seleccionamos los operadores que queremos minimizar, en nuestro caso $SA3$ Aberración óptica de tercer orden y EFL focal efectiva del sistema, para ello le damos peso 1 como vemos en la figura anterior. Para que la focal no se haga cero sino que se reduzca a la mitad, lo que hacemos es $\rightarrow OCM21 - f_{Ef}/2 = OCM21 - 10,65$. Lo que hará esta herramienta es llevar los valores de los operandos a 0 realizando una serie de iteraciones.

Para que el programa haga modificaciones en los radios de las lentes, tenemos que seleccionar en la ventana de datos de la lente que radios queremos modificar para optimizar la lente. Para ello, como podemos ver en la figura 14 tenemos que seleccionarlos como variable y se pondrá una V al lado de estos.

| Gen | Setup | Wavelength | Variables | Draw Off | Group | Notes |
|-----------------|-------------|------------|-------------|------------|---------------|---------------|
| Lens: No name | | | | | | Ef1 10.628299 |
| Ent beam radius | | 5.000000 | Field angle | 5.7329e-05 | Primary wavln | 0.587560 |
| SRF | RADIUS | THICKNESS | APERTURE | RADIUS | GLASS | SPECIAL |
| OBJ | 0.000000 | 9.9956e+03 | 0.009996 | | AIR | |
| 1 | -68.694646 | V | 2.500000 | 25.000000 | GLASS1 | |
| 2 | -177.400301 | V | 4.100000 | 25.000000 | GLASS2 | |
| 3 | 198.656873 | V | 10.000000 | 25.000000 | AIR | |
| 4 | 49.322617 | V | 10.000000 | 15.000000 | GLASS4 | |
| 5 | -21.203902 | V | 15.000000 | 15.000000 | AIR | |
| 6 | 5.196361 | V | 12.000000 | 15.000000 | GLASS6 | |
| 7 | 2.214929 | V | 45.000000 | 15.000000 | AIR | |
| AST | 0.000000 | 0.000000 | 21.212670 | AS | AIR | |
| IMS | 0.000000 | -9.000000 | 16.980091 | S | | |

Figura 14: Pantalla con los radios seleccionados como variable.

Una vez seleccionadas las variables, pondremos en funcionamiento la herramienta dándole al botón *Ite*.

| *ITERATE FULL 10 | | | | |
|------------------|------------|-----------|-----------|--------------|
| NBR | DAMPING | MIN ERROR | CON ERROR | PERCENT CHG. |
| 0 | 1.0000e-08 | 7.707330 | -- | |
| 1 | 6.1580e-09 | 3.230780 | -- | 58.081723 |
| 2 | 0.061580 | 2.950307 | -- | 8.681280 |
| 3 | 3.792096 | 1.777312 | -- | 39.758410 |
| 4 | 0.885520 | 1.358958 | -- | 23.538546 |
| 5 | 3.357978 | 1.178704 | -- | 13.264191 |
| 6 | 0.183112 | 0.786985 | -- | 33.232971 |
| 7 | 0.112760 | 0.407724 | -- | 48.191624 |
| 8 | 0.069438 | 0.273723 | -- | 32.865665 |
| 9 | 0.162149 | 0.230475 | -- | 15.799853 |
| 10 | 0.162149 | 0.184776 | -- | 19.828262 |

Figura 15: Pantalla con las iteraciones realizadas por el programa.

Una vez completado el proceso iterativo veamos como ha cambiado nuestro sistema. Primero veamos que ha ocurrido con la aberración esférica, para ello le daremos al botón *Abr* de la ventana de texto. Como podemos ver en la figura 16 la aberración esférica de tercer orden (*SA3*) ha disminuido bastante con respecto al valor inicial.

| *PARAXIAL TRACE | | | | | | |
|--------------------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| SRF | PY | PU | PI | PYC | PUC | PIC |
| 9 | -16.980088 | -0.470287 | -0.470287 | 2.1214e-06 | -2.3571e-07 | -2.3571e-07 |
| *CHROMATIC ABERRATIONS | | | | | | |
| SRF | PAC | SAC | PLC | SLC | | |
| SUM | -- | -- | -- | -- | | |
| *SEIDEL ABERRATIONS | | | | | | |
| SRF | SA3 | CMA3 | AST3 | PTZ3 | DIS3 | |
| SUM | -0.260410 | -1.6606e-06 | -1.3516e-11 | 1.7342e-12 | -1.9239e-16 | |
| *FIFTH-ORDER ABERRATIONS | | | | | | |
| SRF | SA5 | CMA5 | AST5 | PTZ5 | DIS5 | SA7 |
| SUM | -0.002641 | -2.9408e-07 | -9.9767e-23 | -1.4190e-22 | -5.3457e-28 | 0.009354 |

Figura 16: Pantalla con las aberraciones.

Finalmente veamos como ha quedado gráficamente el sistema de lentes y cual ha sido el cambio en su focal. Como podemos ver en la figura 17, la apariencia del sistema de lentes ha cambiado mucho al corregir la aberración esférica incluso algunos radios como los de la 5ª y 7ª superficie han cambiado incluso de signo. También podemos observar aquí que la focal del sistema se ha reducido prácticamente a la mitad de lo que estaba anteriormente.

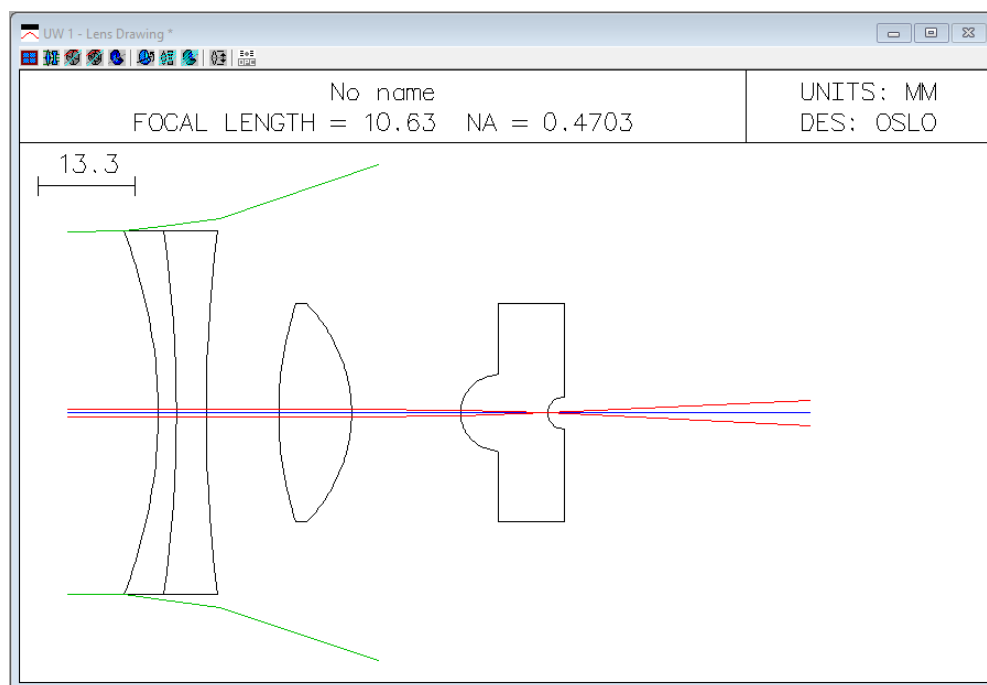


Figura 17: Sistema de lentes tras optimizar la aberración esférica.