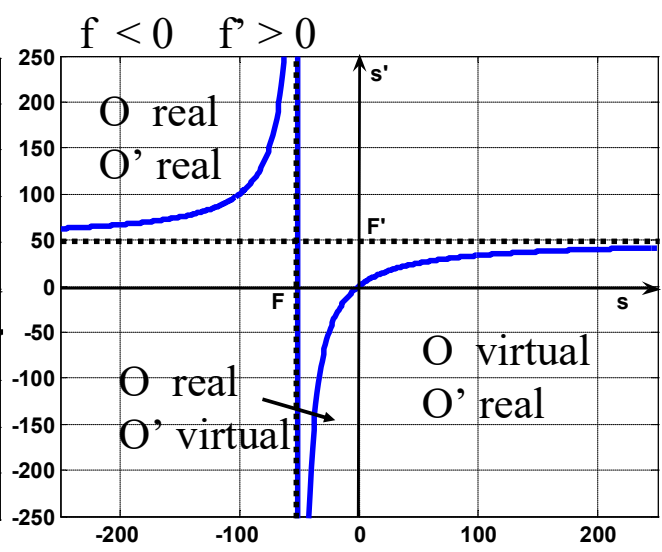
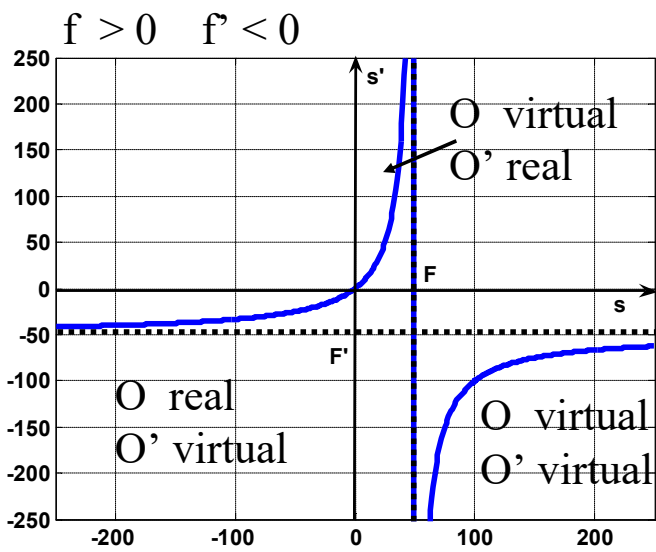
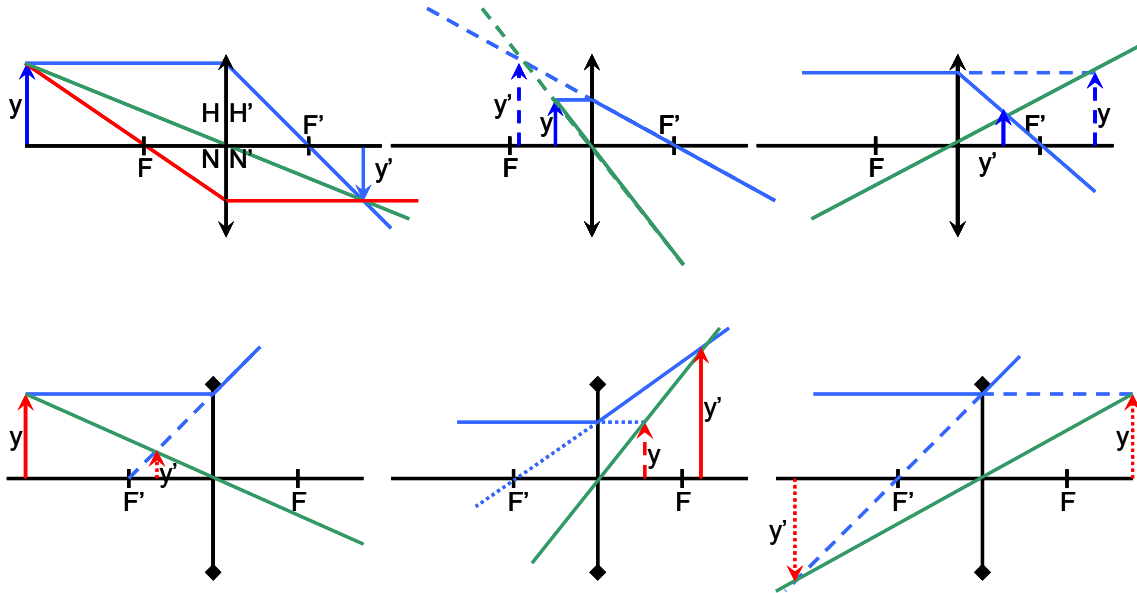


LENTES DELGADAS



Juan Campos Coloma juan.campos@uab.es

Ángel Lizana Tutusaus angel.lizana@uab.cat

Bellaterra, 29/06/2022

1 CONTENIDO

2	Aproximación Paraxial	3
2.1	Relación entre objeto e imagen	3
2.2	Teleobjetivos	4
2.3	Combinación de sistemas	4
2.4	Sistemas Telecéntricos	5
2.5	Telescopios	7
2.6	Microscopios	8
3	Interface con el usuario	9
3.1	Lente Delgada	9
3.2	Teleobjetivo	10
3.3	Sistemas telecéntricos	10
3.3.1	Sistema Telecéntrico en el espacio objeto	10
3.3.2	Sistema Bi-Telecéntrico	11
3.4	Telescopios	11
3.5	Microscopio	14
4	Ejercicios	15

2 APROXIMACIÓN PARAXIAL

En esta Applet vamos a simular el funcionamiento de lentes delgadas e instrumentos ópticos dentro de la aproximación paraxial.

El convenio de signos seguido es el siguiente. El origen de coordenadas se sitúa en la lente o en la superficie de separación entre dos medios. Si la distancia a un punto va en la dirección de propagación de la luz se tomará como positiva, y si va en sentido contrario se tomará como negativa.

2.1 RELACIÓN ENTRE OBJETO E IMAGEN

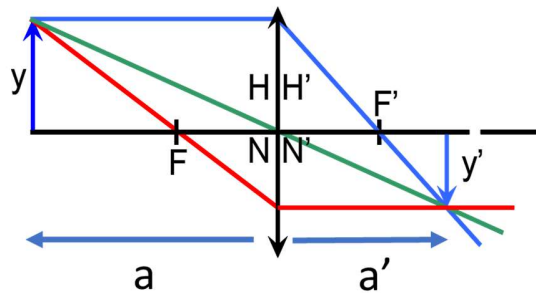


Figure 2-1. Relación entre objeto e imagen. Lente convergente

Dada una lente de focal f' las relaciones de posiciones del objeto e imagen con respecto a la lente (o planos principales) viene dada por

$$\boxed{-\frac{1}{a} + \frac{1}{a'} = \frac{1}{f'}} \quad (1.1)$$

NOTA: Las distancias se miden desde la lente (planos principales) y son positivas si van en la dirección de propagación de la luz.

Los aumentos laterales nos dan la relación de tamaños entre la imagen y el objeto viene dada por:

$$\boxed{\beta' = \frac{y'}{y} = \frac{a'}{a}} \quad (1.2)$$

2.2 TELEOBJETIVOS

En ocasiones se quiere conseguir una focal muy grande, pero con una distancia entre la última lente y el plano focal imagen final pequeño. Esto se puede conseguir con los teleobjetivos formados por dos sistemas uno convergente y otro divergente. El foco imagen del primer sistema ha de caer cerca y delante del foco objeto del segundo.

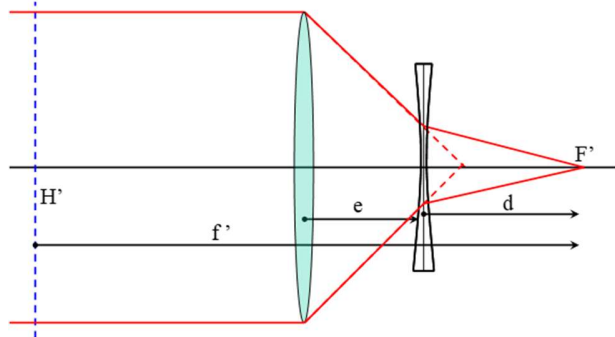


Figure 2-2. Esquema de un teleobjetivo

2.3 COMBINACIÓN DE SISTEMAS

Sean dos sistemas ópticos de focales f'_1 y f'_2 , con una separación “e” entre el plano principal imagen del primero (H'_1) y el plano principal objeto (H_2) del segundo, suponiendo que los índices intermedios son iguales.

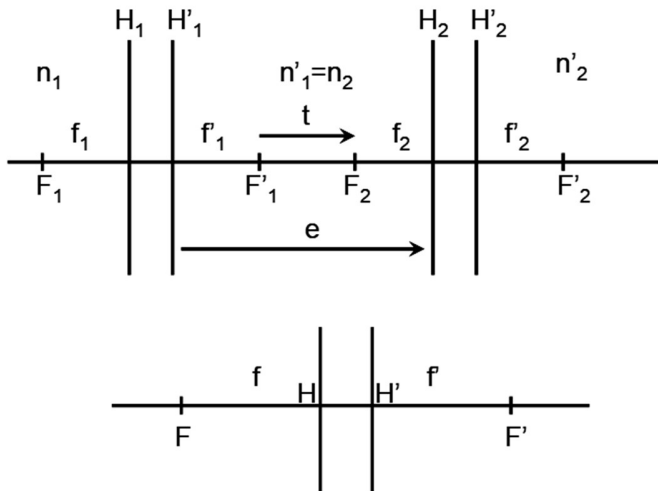


Figure 2-3. (arriba) Composición de dos sistemas ópticos y (abajo) sistema final

La distancia focal total y la posición de los planos principales del sistema conjunto vienen dados por:

$$\begin{aligned}
 f &= \frac{f'_1 f'_2}{f'_1 + f'_2 - e} & d &= \frac{(f'_1 - e) f'_2}{f'_1 + f'_2 - e} \\
 H'_2 H' &= -\frac{e f'_2}{f'_1 + f'_2 - e} & H_1 H &= \frac{e f'_1}{f'_1 + f'_2 - e} \\
 \phi' &= \phi'_1 + \phi'_2 - e \phi'_1 \phi'_2
 \end{aligned}
 \tag{1.3}$$

2.4 SISTEMAS TELECÉNTRICOS

<https://www.opto-e.es/resources/telecentric-lenses-tutorial>

<https://www.edmundoptics.es/knowledge-center/application-notes/imaging/advantages-of-telecentricity/>

Son sistemas que, mediante la colocación adecuada del diafragma de apertura, permiten eliminar errores de paralaje.

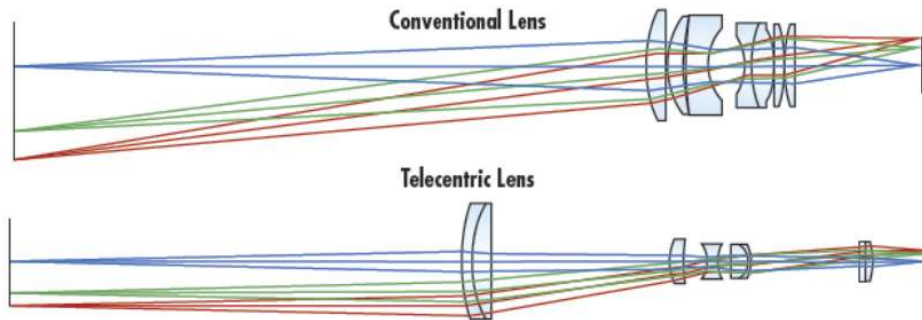


Figure 1: Field of View comparison of a Conventional and Telecentric Lens. Note the conventional lens's angular field of view and the Telecentric Lens's zero angle field of view

Figure 2-4. Sistema convencional y sistema telecéntrico. Figura sacada de [Edmund Optics](https://www.edmundoptics.com)

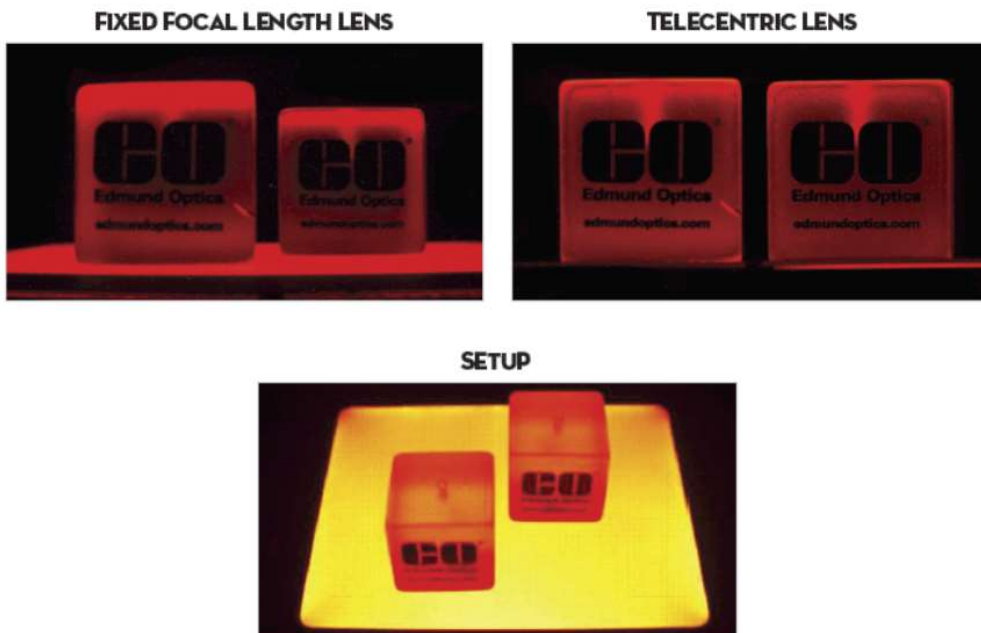


Figure 2: The Angular Field of View of the Fixed Focal Length Lens translates to Parallax Error in the Image and causes the two Cubes to appear to be different sizes

Figure 2-5. Imágenes tomadas con un sistema normal y otro telecéntrico. Figura sacada de [Edmund Optics](https://www.edmundoptics.com)

Son especialmente útiles para metrología, de tal manera que se puedan determinar bien las dimensiones independientemente de la posición del objeto, dentro de un rango de trabajo. En las figuras Figure 2-4 y Figure 2-5 se muestra la diferencia entre imágenes tomadas con un sistema convencional y otro telecéntrico.

Dependiendo de la colocación del diafragma de apertura se pueden clasificar como

- a) Sistema telecéntrico en el espacio objeto: La pupila de entrada está en el infinito, es decir, el diafragma de apertura está en el plano focal imagen del primer sistema

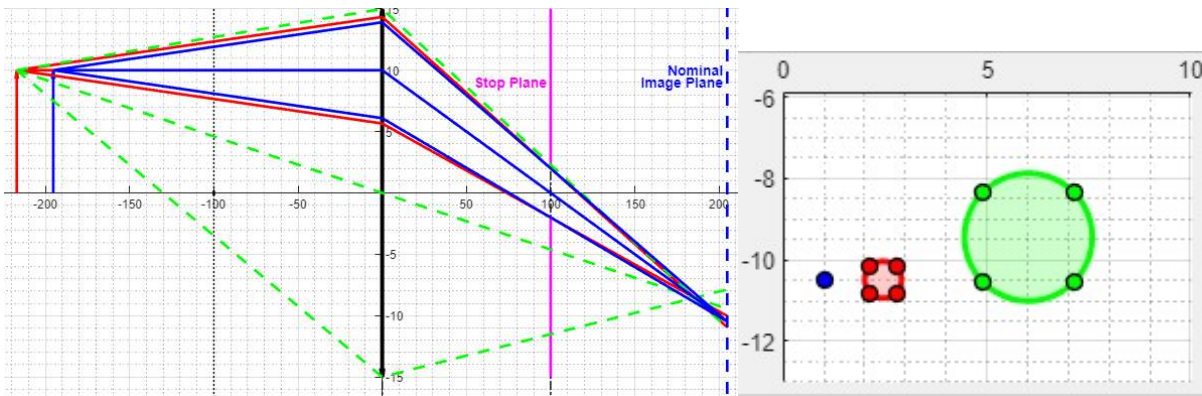


Figure 2-6. Sistema telecéntrico en el espacio objeto. A la derecha imagen de un punto en el extremo del objeto

En la Figure 2-6 se ve un ejemplo de este tipo de sistemas. El plano objeto e imagen nominal se dibujan en azul. Si tenemos otro objeto (en rojo) a otra distancia de la lente, en el plano imagen nominal se verá desenfocada, pero el centro de masas de la imagen de un punto estará a la misma altura, tal como se ve en la figura de la derecha. Si se utilizase toda la apertura de la lente (rayos en verde) se ve que el centroide se desplazaría, con lo que las dimensiones medidas cambiarían. Esto es debido a que el rayo principal, el que pasa por el centro del diafragma de apertura, entra paralelo al sistema

- b) Sistema telecéntrico en el espacio imagen: La pupila de salida está en el infinito, es decir, el diafragma de apertura está en el plano focal objeto del último sistema
- c) Sistema bi-telecéntrico: la pupila de entrada y de salida están en el infinito

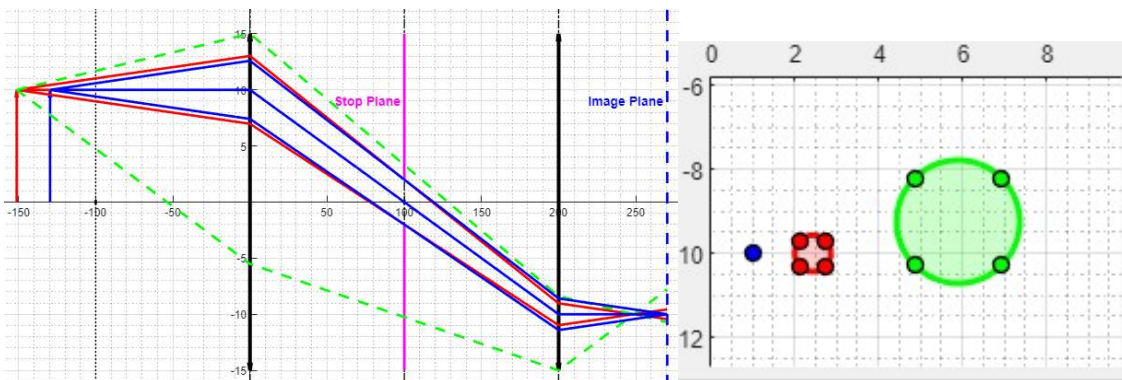


Figure 2-7. Sistema bitemporal. A la derecha, imagen de un punto en el extremo del objeto

Para ello, el diafragma de apertura ha de estar en el plano focal imagen del sistema que tenga delante, y en el plano focal objeto del que tenga detrás. En este caso, desplazamientos, tanto del objeto como del plano imagen, no comportan un cambio de posición del centroide.

2.5 TELESCOPIOS

Son los instrumentos ópticos utilizados para la observación de objetos muy alejados. Con el fin de que el observador mire la imagen formada por el instrumento sin acomodación será necesario que el instrumento óptico forme la imagen en el infinito. Para conseguir esto, los telescopios están formado, en general, por dos sistemas, objetivo y ocular, acoplados foco con foco $F_{ob}^l \equiv F_{oc}$ \Rightarrow Sistema afocal focos y planos principales en el infinito.

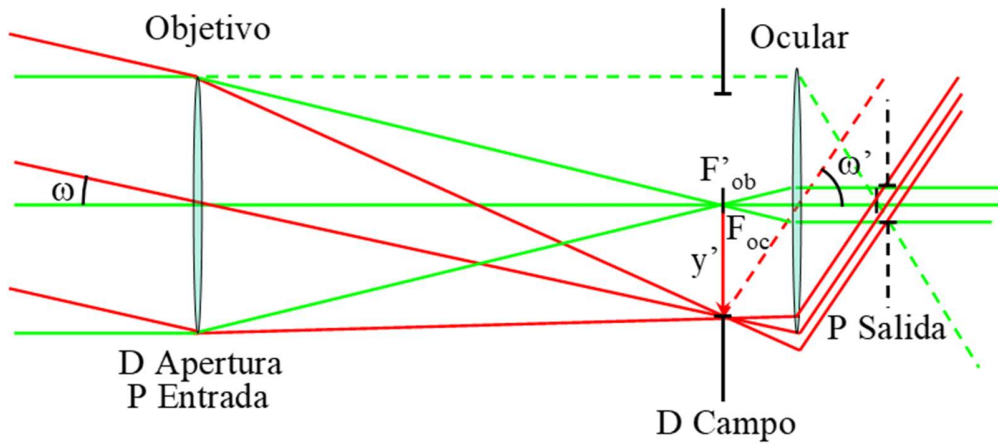


Figure 2-8. Anteojo astronómico

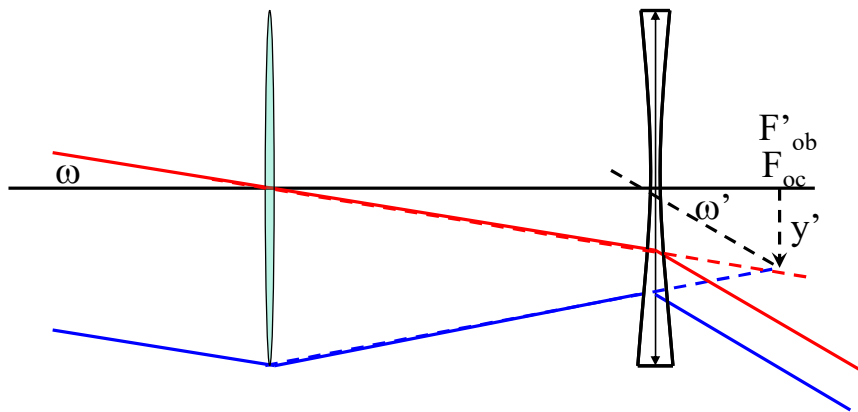


Figure 2-9. Anteojo de Galileo

Los aumentos visuales se definen como el cociente entre la tangente del ángulo w' a la salida del sistema y el ángulo w a la entrada, que a su vez tiene que ver con el cociente de tamaños en la retina usando el telescopio y sin usarlo.

$$\Gamma' = \frac{\tan \omega'}{\tan \omega} = \frac{\frac{y'}{f'_{oc}}}{\frac{-y'}{f'_{ob}}} = -\frac{f'_{ob}}{f'_{oc}} \tag{1.4}$$

En la Figure 2-8 se muestra el esquema de un anteojo astronómico con aumentos negativos, mientras que en la Figure 2-9 se muestra el esquema de un anteojo de Galileo con aumentos positivos.

Si se quiere observar un objeto cercano, habrá que separar el objetivo y el ocular para que la imagen intermedia caiga en el plano focal objeto del ocular. Si el observador no es emétrepe, es decir, tiene miopía o hipermetropía, y observa sin corrección, habrá que modificar la posición del ocular para que la imagen que dé esté en el punto remoto del observador.

2.6 MICROSCOPIOS

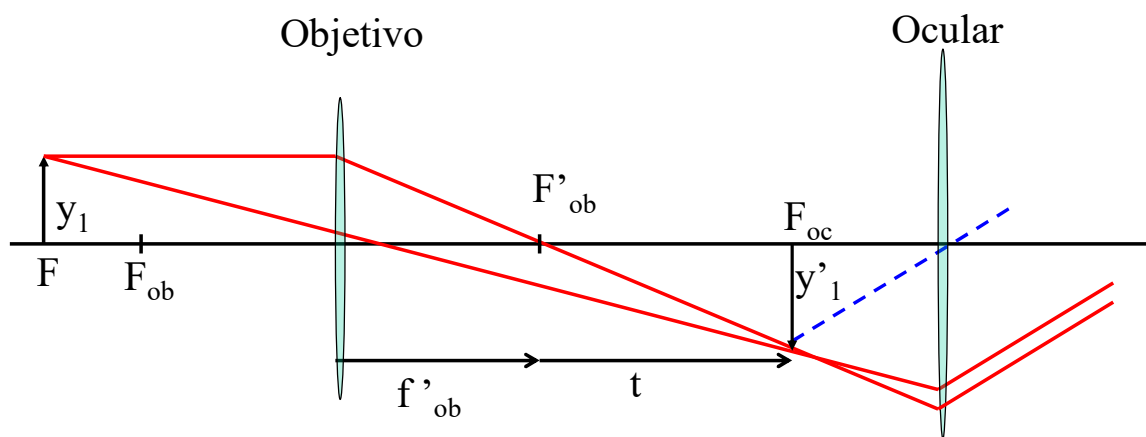


Figure 2-10. Microscopio compuesto

Son instrumentos de visión cercana, es decir forman la imagen de un objeto que está a una distancia finita en el infinito para que un observador emétrepe vea la imagen sin acomodar el ojo. Están formado, básicamente, por un objetivo y un ocular. El objetivo forma una imagen intermedia con un gran aumento lateral en el plano focal objeto del ocular. En los sistemas actuales se suele poner un sistema intermedio, de tal manera que el objetivo forme la imagen en el infinito, y el sistema intermedio la traslade al plano focal objeto del ocular.

Los aumentos visuales del sistema vienen dados por el producto de los aumentos laterales del objetivo (β') y los aumentos visuales del ocular

$$\Gamma = \frac{-t}{f'_{ob}} \frac{250}{f'_{oc}} \quad (1.5)$$

$$\beta' = \frac{y'_1}{y_1} = \frac{-t}{f'_{ob}} \quad (1.6)$$

3 INTERFACE CON EL USUARIO

Al iniciar el programa aparece la ventana principal. En la parte superior se dibujará el sistema en cuestión y el trazado de algunos rayos ilustrativos del comportamiento. En la parte inferior aparecen diferentes pestañas cada una de ellas contiene los datos del instrumento a tratar.

3.1 LENTE DELGADA

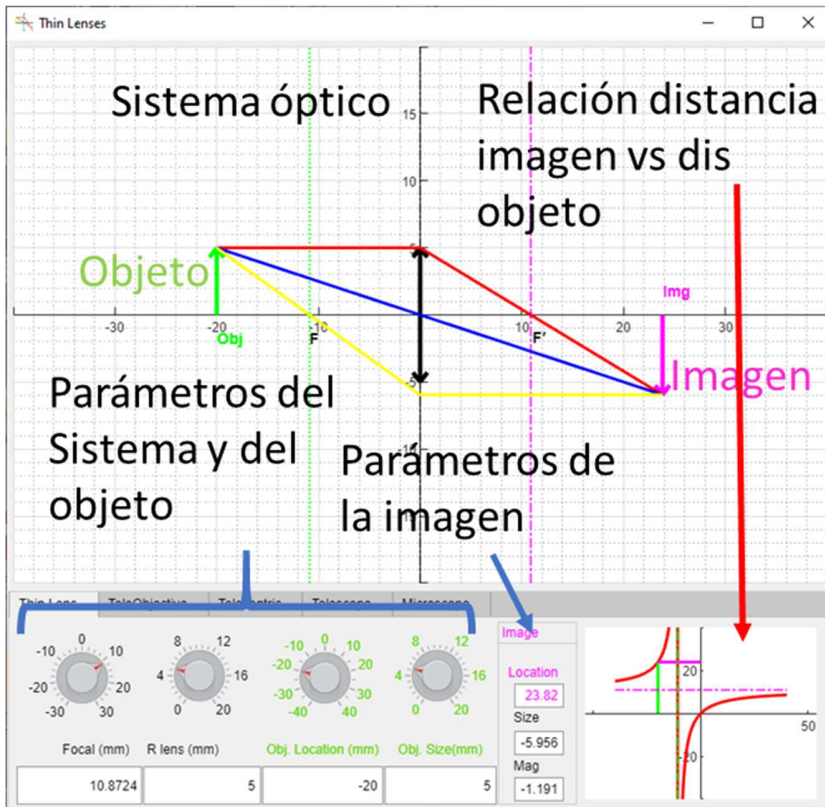


Figure 3-1. Sistema óptico formado por una única lente delgada

En la pestaña “Thin Lens” se estudia el comportamiento de una lente delgada.

Los parámetros del sistema que se pueden modificar son:

- Focal del sistema
- Radio de la lente

Mientras que del objeto se puede modificar

- Localización (<0 => obj real; >0=> obj virtual)
- Tamaño

Cuando se cambia alguno de los parámetros se calcula la posición y tamaño de la imagen, y se dibujan tres rayos: El que entra paralelo al eje del sistema, el que pasa por el dentro de la lente y el que pasa por el foco objeto del sistema.

Además, se representa en otra gráfica la relación entre la posición de la imagen (eje Y) y la posición del objeto (eje X), mostrando esta relación para el caso particular calculado

3.2 TELEOBJETIVO

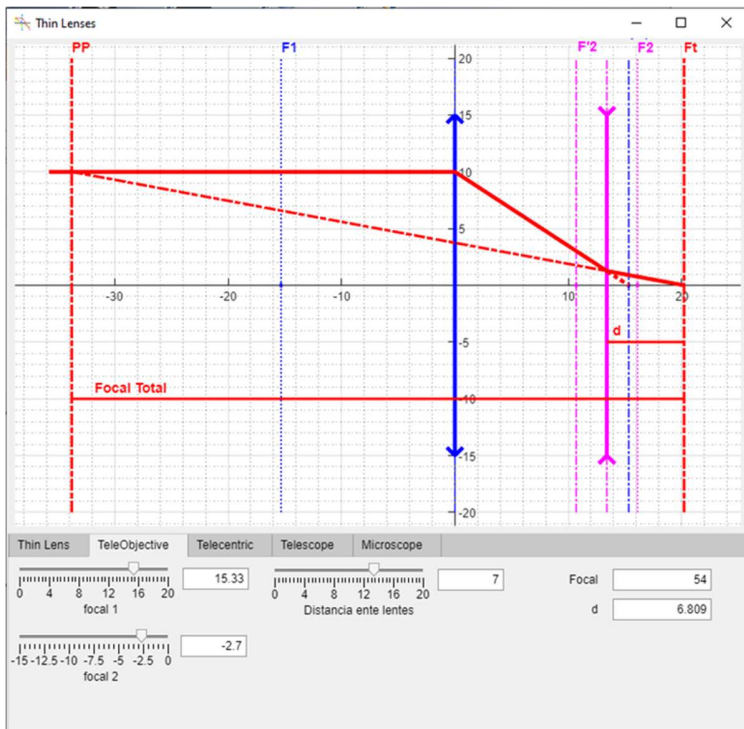


Figure 3-2. Diseño de un teleobjetivo formado por una lente convergente (en azul) y una divergente (en magenta)

En la pestaña “TeleObjective” se estudia el diseño de un teleobjetivo formado por una lente convergente y una divergente, de tal manera que el foco imagen de la primera caiga un poco por delante del foco objeto de la segunda.

Los parámetros que se pueden modificar son las focales de las dos lentes y la distancia entre las mismas.

Se traza un rayo para determinar la posición del plano principal imagen (PP en la figura), y se calcula la focal total del sistema y la distancia “d” entre la última lente y el plano focal imagen final.

3.3 SISTEMAS TELECÉNTRICOS

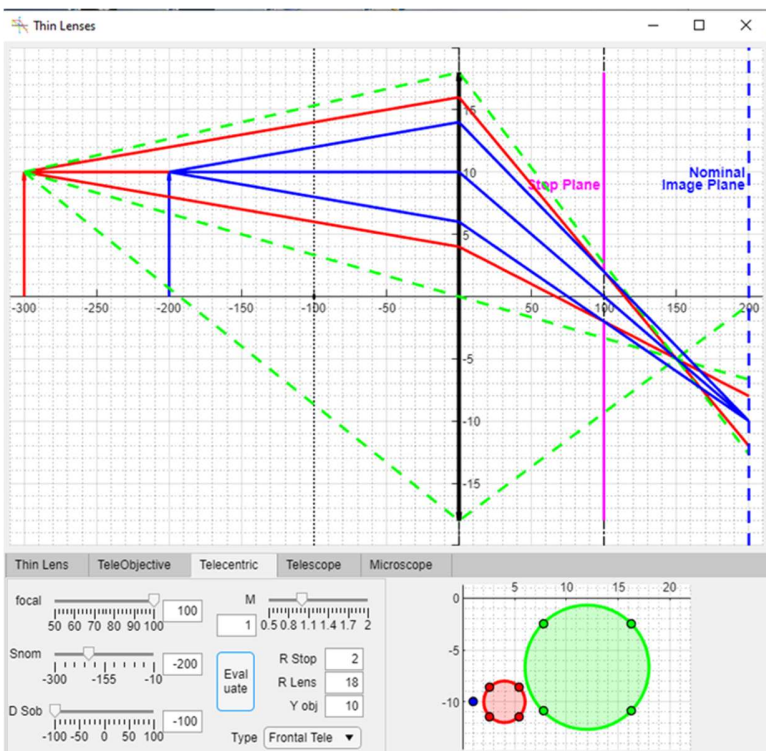
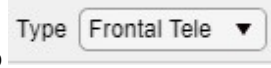


Figure 3-3. Sistema telecéntrico en el espacio objeto

En la pestaña “Telecentric” se analizan los sistemas telecéntricos. Se puede seleccionar estudiar un sistema telecéntrico en el espacio objeto o un sistema bi-telecéntrico



3.3.1 Sistema Telecéntrico en el espacio objeto

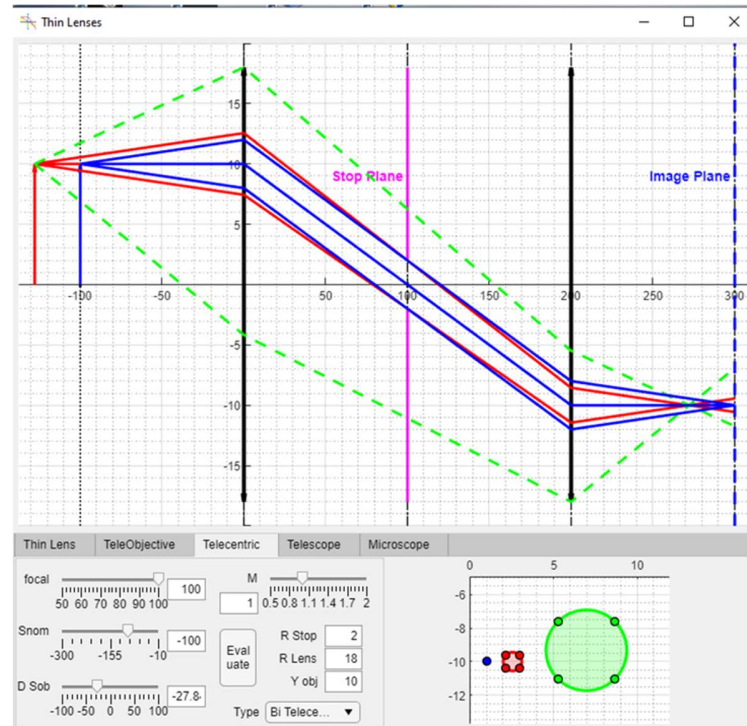
En este caso se puede cambiar la focal del sistema “focal”, el radio de la lente “R Lens” y el radio del diafragma de apertura “R stop”.

La posición nominal del objeto “Snom”, se dibuja en azul, mientras que la posición de un objeto desplazado se puede cambiar en “D Sob” dando la distancia entre la posición nominal y la actual. Se dibuja en rojo. Se puede cambiar también la altura del objeto “Y obj”

En la ventana principal se muestra el trazado de los rayos que salen del extremo de un objeto en la posición nominal (en azul) y del objeto desplazado (en rojo). Se trazan los rayos que pasarían por los extremos y el

centro del diafragma de apertura. El plano imagen nominal se dibuja en azul y los rayos se trazan hasta el mismo para ver las dimensiones y posición de la imagen del punto extremo del objeto. También se traza en verde los rayos que saliendo del extremo del objeto pasan por el extremo de la lente. Una estimación de la imagen de los puntos en el plano imagen se representa en la figura de abajo a la derecha, para ver que con el diafragma funcionando, los centroides están a la misma altura, mientras que, si se utiliza todo el diámetro de la lente, el centroide se desplaza.

3.3.2 Sistema Bi-Telecéntrico



En este caso, además de los parámetros mencionados anteriormente, se puede modificar el parámetro “M” que es el cociente entre la focal de la segunda lente y la focal de la primera, y tiene que ver con los aumentos del sistema.

Los rayos en verde son los rayos extremos que pasan a través de las dos lentes

Figure 3-4. Sistema Bi-Telecéntrico

3.4 TELESCOPIOS

En la pestaña “Telescope” se analiza el comportamiento de los anteojos. Se estudian dos tipos: Anteojo astronómico y Anteojo de Galileo.

Se han de dar las focales del objetivo (>0) y la del ocular (>0 ó <0), el radio de las lentes y el ángulo inicial (W)

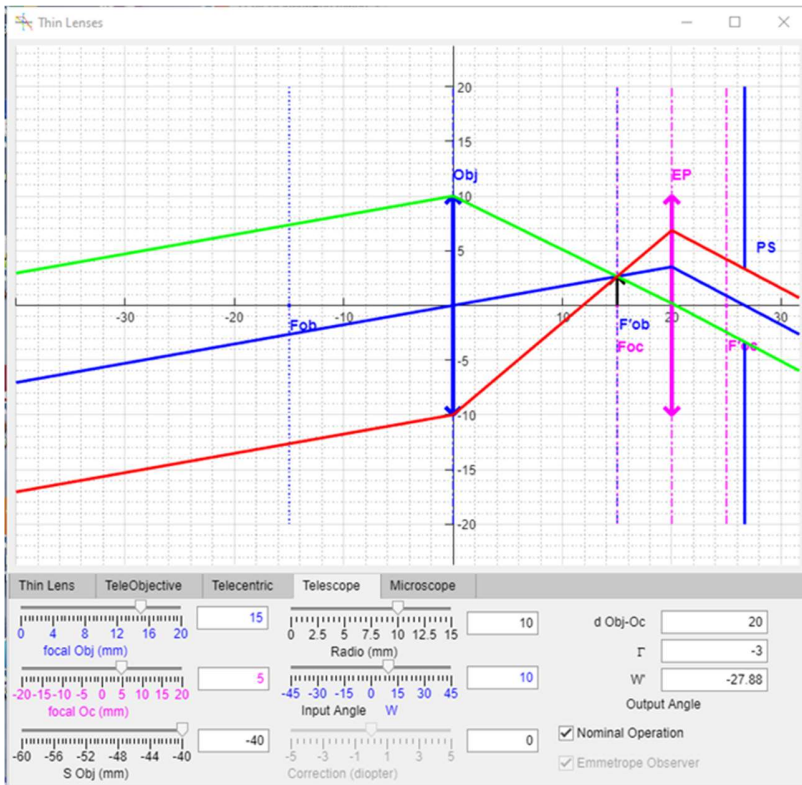


Figure 3-5. Anteojo astronómico trabajando en condiciones nominales

Se puede hacer que el telescopio no trabaje en las condiciones nominales, desmarcando el control

Nominal Operation, con un objeto a distancia finita. En este caso, hay que dar la posición del objeto. El parámetro W se convierte en la altura del objeto $h=W/10$;

Los resultados son la distancia entre el objetivo y el ocular, el ángulo a la salida y los aumentos visuales.

Se dibuja el objeto intermedio y la pupila de salida

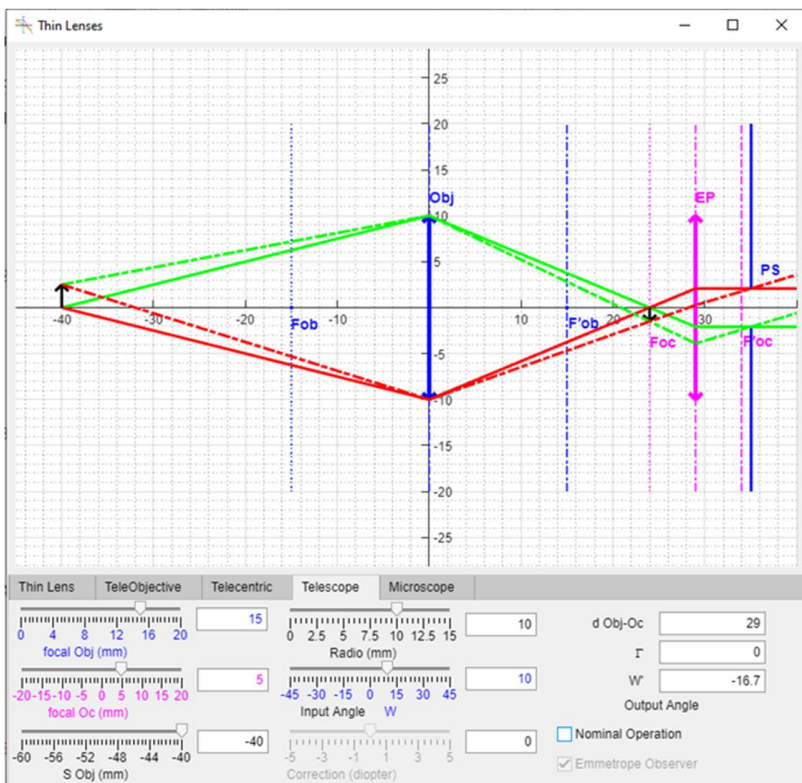


Figure 3-6. Anteojo astronómico trabajando con objeto a distancia finita

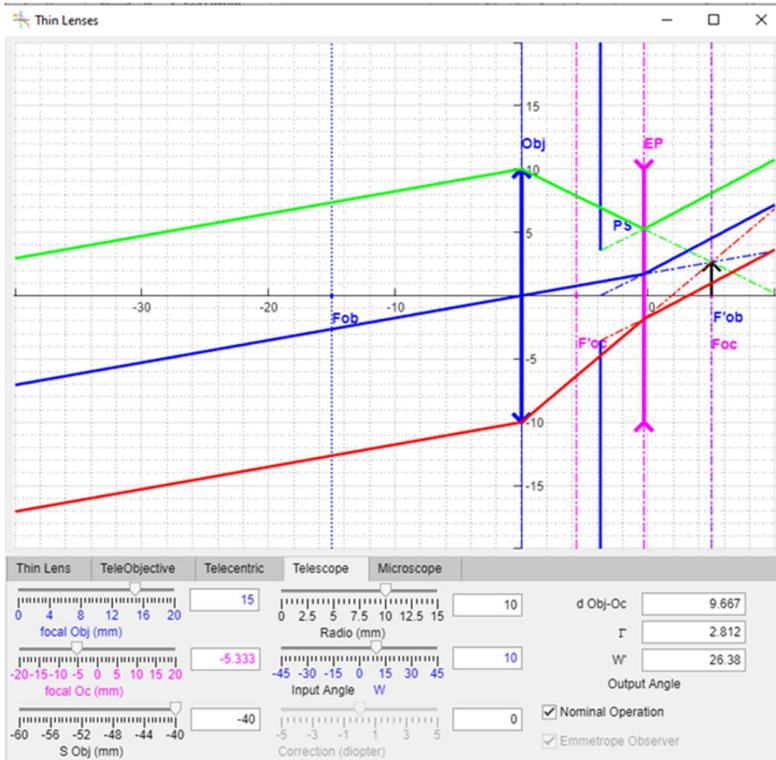


Figure 3-7. Anteojo de Galileo trabajando con objeto al infinito

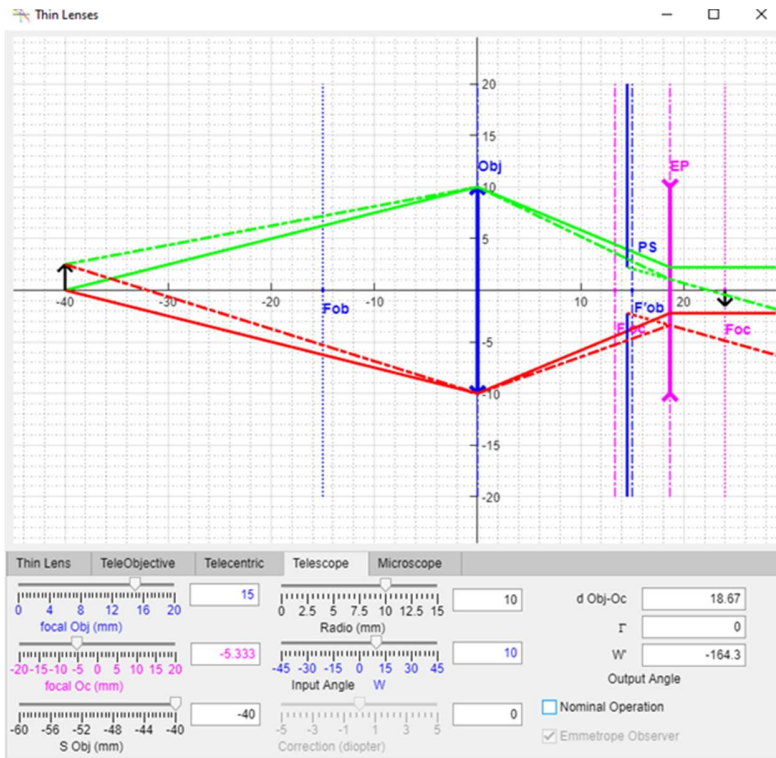


Figure 3-8 Anteojo de Galileo trabajando con objeto a distancia finita

3.5 MICROSCOPIO

El análisis de los microscopios se realiza en la pestaña “Microscope”, en la que se puede seleccionar las focales del objetivo y del ocular, así como la distancia t entre el foco imagen del objetivo y el foco objeto del ocular.

Como resultados se dan la posición del objeto, la posición de la pupila de salida, la distancia entre el objetivo y el ocular, los aumentos lineales del objetivo, los aumentos visuales del ocular, y los aumentos visuales del microscopio

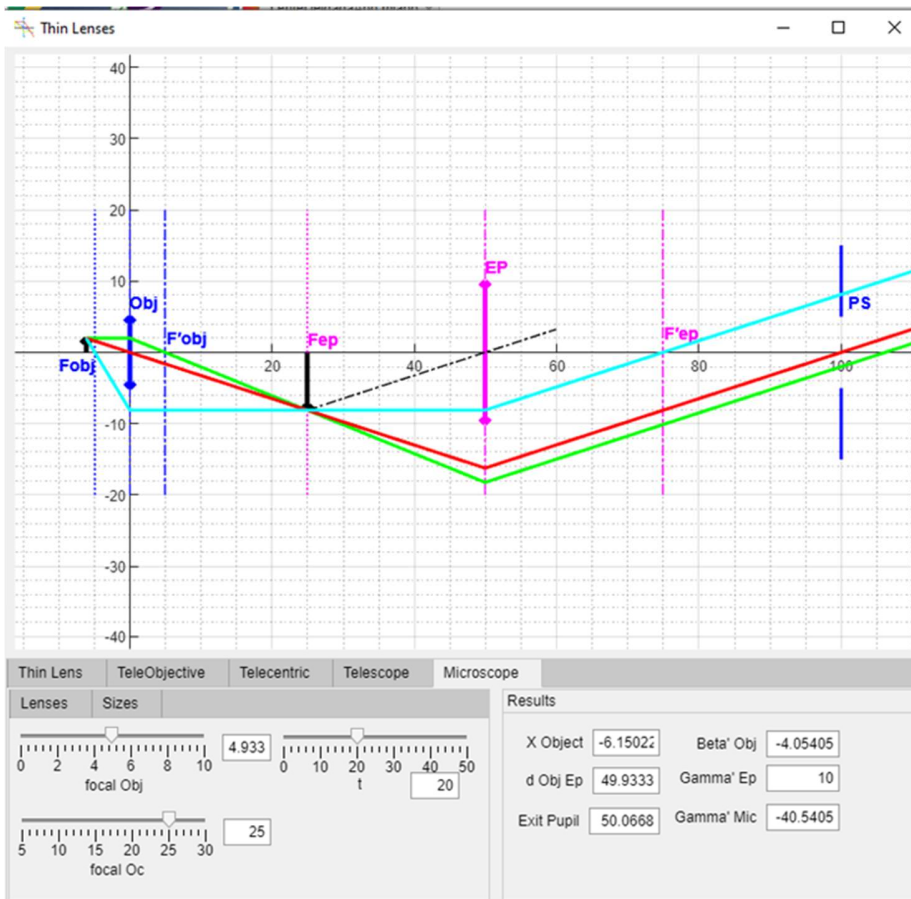


Figure 3-9. Microscopio compuesto

4 EJERCICIOS
