

TELESCOPIOS



Erick Barrios Barocio; Roxette Ramírez Arvidez.
Óptica, v.2025

Una de las aplicaciones científicas más populares de las lentes y espejos se encuentra en el diseño e implementación de telescopios. Estos instrumentos han sido la base de la astronomía y han permitido hacer una vasta cantidad de descubrimientos sobre el universo. Los Telescopios basan su funcionamiento en la teoría de lentes delgadas y de espejos esféricos, ya que un arreglo adecuado de estos elementos, permiten la magnificación de objetos muy lejanos.

Contenido

1	LA LUPA.....	1
2	TELESCOPIOS.....	3
2.1	Telescopio Refractor.....	3
2.2	Telescopio Reflector.....	5
3	INCERTIDUMBRES EN MEDICIONES DIRECTAS Y ÚNICAS.....	6
4	REFERENCIAS.....	6

El significado de la palabra telescopio incorpora el propósito del aparato, viene del prefijo tele- el cual significa “lejos” y el sufijo -scopio, “ver”, por lo que se trata de un instrumento para observar objetos lejanos. Desde el siglo XVII se usó para observar la Luna, Júpiter, las estrellas y estudiar la naturaleza de los cuerpos celestes y nuestra ubicación en el universo.

Históricamente, se atribuye su invención en el año 1608 a Hans Lippershey, un fabricante de lentes Holandés. Galileo Galilei, al recibir noticias de este invento, decidió diseñar y construir uno propio, y en 1609 mostró el primer telescopio astronómico registrado. Gracias a él, hizo grandes descubrimientos en astronomía, entre los que destaca la observación, el 7 de enero de 1610, de cuatro de las lunas de Júpiter girando en una órbita en torno a ese planeta.



Figura 1. Telescopio reflector de I. Newton (1668).

Inicialmente, los telescopios eran ópticos (los cuales funcionan en la región visible del espectro), pero actualmente han evolucionado y abarcan una región mayor del espectro electromagnético (radiotelescopios, infrarrojos, ultravioletas). Dentro del grupo de telescopios ópticos, existen distintos tipos de telescopio: refractores (que utilizan lentes), reflectores (que tienen un espejo cóncavo en lugar de la lente del objetivo), y catadióptricos (que poseen un espejo cóncavo, una lente correctora y un espejo secundario).

El telescopio reflector fue inventado por Isaac Newton en 1668 (Figura 1) y constituyó un importante avance sobre los telescopios de su época al corregir el problema de la aberración cromática característica de los telescopios refractores.

En este texto nos enfocaremos en los telescopios refractores y reflectores, y para entender su funcionamiento, es necesario conocer cómo funciona una lupa.

1 LA LUPA.

Una lupa es una lente simple utilizada para producir imágenes virtuales magnificadas de un objeto, y que trabaja bajo la ecuación de lentes delgadas.

Para entender su funcionamiento, supongamos que un objeto está a cierta distancia o del ojo (Figura 1a). El tamaño angular de la imagen formada en la retina depende del ángulo θ subtendido por el objeto desde el ojo. A medida que el objeto se acerca al ojo, θ aumenta y el objeto se observa más grande.

Sin embargo, en promedio, un ojo normal es incapaz de enfocar sin esfuerzo objetos más cercanos que aproximadamente 25cm ^[1, 2], denominado "*punto cercano*" (i_{pc}) (Figura 1b); aunque este valor puede variar de una

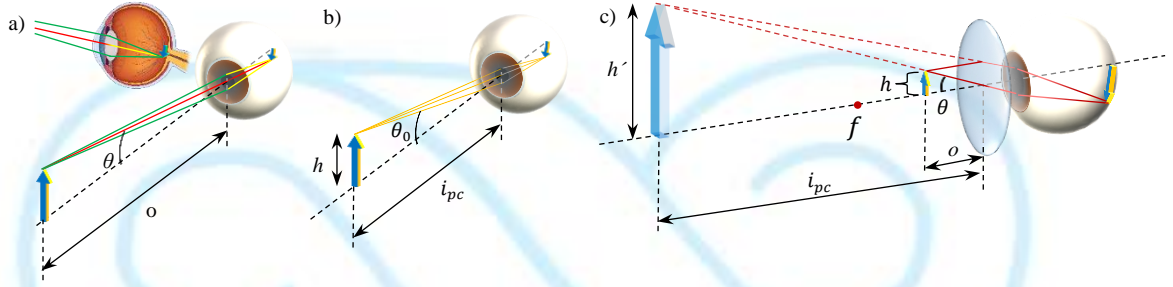


Figura 1. a) El tamaño de la imagen formada depende del ángulo subtendido; b) un objeto situado en el *punto cercano* subtiende un ángulo θ_0 ; c) un objeto colocado dentro del punto focal de una lente convergente produce una imagen virtual magnificada y enfocada.

persona a otra y con la edad. Debido a esto, consideraremos que el tamaño máximo (h) con que se puede observar el objeto es θ_0 , que se encuentra cuando el objeto está en el punto cercano (i_{pc}).

Para poder aumentar el tamaño angular del objeto, y seguir viéndolo enfocado, se puede colocar una lente convergente enfrente del ojo (Figura 1c), y posicionar el objeto dentro del punto focal de la lente. En tal posición, la lente formará una imagen virtual del objeto la cual tendrá un tamaño mayor, pero estará a una distancia más alejada de la lente (fuera del punto focal). Sin embargo, hay que notar que esta imagen virtual debe estar en o más allá del punto cercano si queremos verla de forma nítida.

Por otro lado, el *aumento angular* (m) será la razón entre el ángulo subtendido por la imagen virtual generada por la lente (θ) y el ángulo subtendido por el objeto cerca del *punto cercano* sin lente (θ_0):

$$m = \frac{\theta}{\theta_0} \quad (1)$$

El aumento angular será máximo cuando la imagen virtual esté en el punto cercano del ojo (i_{pc}), y la posición del objeto correspondiente a esta distancia a la imagen puede calcularse a partir de la fórmula de la lente delgada (tomando en cuenta que la posición de la imagen virtual es negativa).

$$o = \frac{|i_{pc}|f}{|i_{pc}| + f} \quad (2)$$

Tomando en cuenta la aproximación paraxial en las Figuras 1b y 1c:

$$\tan\theta_0 \approx \theta_0 \approx \frac{h}{i_{pc}} \quad \text{y} \quad \tan\theta \approx \theta \approx \frac{h}{o} \quad (3)$$

Por lo que, sustituyendo en la ecuación (1), tenemos:

$$m_{max} = 1 + \frac{|i_{pc}|}{f} \quad (4)$$

Aunque el ojo puede enfocar una imagen formada en cualquier lugar entre el punto cercano y el infinito, está más relajado (menor tensión muscular) cuando la imagen está en el infinito, y para que la imagen formada por la lupa aparezca en el “infinito”, el objeto tiene que estar en el punto focal de la lente. En dicha configuración, la imagen también está magnificada, pero dicha magnificación será menor comparada con la dada por la ecuación (4):

$$m_{min} = \frac{|i_{pc}|}{f} \quad (5)$$

Para comprobar experimentalmente la magnificación generada por una lupa, es necesario medir el tamaño de la imagen virtual, sin embargo, al ser virtual, no podemos medirla directamente. Para solucionar esto, es necesario utilizar otra lente de foco conocido (lente auxiliar) para generar una proyección (imagen real) de la imagen virtual en una pantalla (Figura 2), y así poder realizar una medición indirecta del tamaño de la imagen virtual usando la ecuación de lente delgada.

Entonces, es necesario colocar la lupa de forma que, al observar con ella el objeto, produzca una magnificación (de preferencia máxima) y genere una imagen virtual en el punto cercano del observador. Posteriormente, se colocan la lente auxiliar y la pantalla como en la Figura 2 y se posicionan de forma que la imagen virtual ahora sea el objeto (virtual) de la lente auxiliar y genere una imagen real en la pantalla. Esto permite medir el tamaño de la imagen proyectada directamente, y utilizando las ecuaciones de lente delgada y magnificación, es posible conocer el tamaño y posición (respecto de la lente auxiliar) del objeto virtual, lo cual permite comprobar la ecuación de magnificación de la lupa.

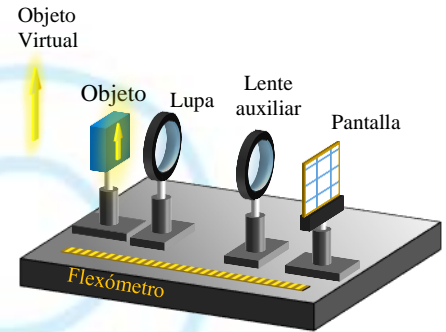


Figura 2. Arreglo experimental para analizar la magnificación de una lupa.

2 TELESCOPIOS.

Los telescopios son instrumentos ópticos diseñados para observar objetos distantes mediante la magnificación producida por sistemas de lentes y/o espejos. Existen dos tipos generales de telescopios: el *telescopio refractor* que utiliza combinaciones de lentes y el *telescopio reflector* que utiliza espejos y lentes.

2.1 TELESCOPIO REFRACTOR.

En esta categoría, hay dos subtipos principales, el telescopio *Kepleriano* y el *Galileano*, cuya diferencia está en las lentes que usan [1, 2, 3, 4].

A) TELESCOPIO KEPLERIANO.

El arreglo de lentes mostrado en la Figura 3 es un telescopio Kepleriano simple. Este telescopio cuenta con un objetivo y un ocular convergentes co-lineales.

El objetivo forma una imagen real e invertida de un objeto muy distante (en el “infinito”), lo cual posiciona la imagen (I_1) muy cerca de su foco (f_o). A continuación, el ocular se coloca de forma que I_1 este muy cerca del foco del ocular (f_e), pero por su parte interna, esto hará que el ocular actúe como lupa sobre la imagen producida por el objetivo, produciendo una imagen virtual ampliada y que se localiza frente al ocular en I_2 (Figura 3).

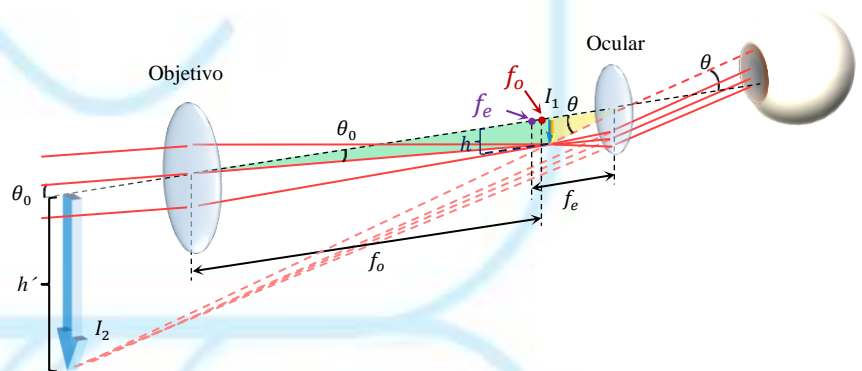


Figura 3. Diagrama de un Telescopio Kepleriano cuyo objeto está en el infinito.

En la práctica, para evitar aberraciones y que el ojo este relajado, la imagen I_2 se debe posicionar muy lejos del sistema (en el “infinito”). En consecuencia, los focos del objetivo y el ocular estarán tan cercanos que se pueden asumir sobrepuestos, con lo cual los dos lentes estarán separados por una distancia aproximada de $f_o + f_e$, que corresponde a la longitud del tubo del telescopio (L). Además, en dicha situación, la imagen I_1 al estar muy cerca del foco del ocular,

producirá que los rayos de luz que salen del ocular salgan prácticamente paralelos (entendible ya que I_2 está en el infinito).

Para calcular la magnificación producida por el telescopio, pensaríamos en usar la ecuación de lentes delgadas y su correspondiente ecuación de magnificación ($m = -i/o$), sin embargo, dado que involucra el uso de infinitos, puede generar confusiones, por lo que es mejor seguir la propuesta de la ecuación (1). El aumento angular del telescopio estará dado por θ/θ_0 , donde θ_0 es el ángulo subtendido por el objeto que observa el objetivo, y θ es el ángulo subtendido por la imagen final. En la Figura 3, podemos observar que los triángulos rectángulos formados por los rayos que cruzan las lentes por sus centros (triángulos verde y amarillo), son congruentes en uno de sus lados, justo donde está la imagen I_1 , por lo que:

$$\tan\theta_0 \approx \theta_0 = \frac{h}{f_0} \quad (6)$$

Notar que los signos negativos de h y de f_0 (el cual está detrás de la lente) se cancelan. Mientras que:

$$\tan\theta \approx \theta = -\frac{h}{f_e} \quad (7)$$

En esta segunda relación hay un signo negativo, ya que el foco del ocular (f_e) es positivo por estar frente a la lente. Así, el aumento angular del telescopio será:

$$m = \frac{\theta}{\theta_0} = -\frac{f_0}{f_e} \quad (8)$$

B) TELESCOPIO GALILEANO.

El principio de operación de este telescopio es el mismo que el Kepleriano, salvo que utiliza un ocular divergente (Figura 4). En este arreglo el telescopio es más corto y la imagen final no está invertida. Sin embargo, tiene un limitado campo de visión ya que los rayos de salida son divergentes, produciendo tensión en el ojo y no permite magnificaciones grandes sin problemas de aberraciones. Aun así, se puede demostrar (de la misma forma que con el telescopio Kepleriano) que la magnificación angular estará dada por:

$$m = \frac{\theta}{\theta_0} = \frac{f_0}{f_e} \quad (9)$$

En este caso la magnificación es positiva ya que ambos focos están detrás de las lentes, siendo ambos negativos, y la imagen de referencia (I_1) esta invertida, cancelándose los signos.

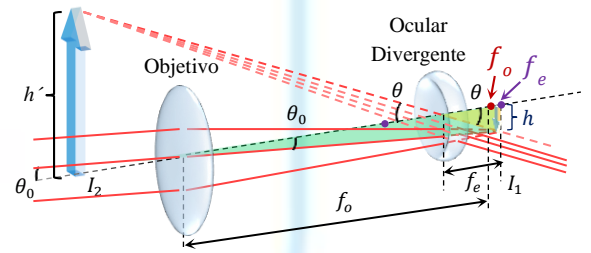


Figura 4. Diagrama de un Telescopio Galileano.

2.2 TELESCOPIO REFLECTOR.

Un telescopio reflector tiene un espejo parabólico cóncavo (llamado *espejo principal*) en sustitución del lente objetivo, aunque el espejo también puede ser esférico a expensa de presentar aberraciones. Sin embargo, el desarrollo de las ecuaciones para obtener la magnificación sigue siendo exactamente el mismo que para los telescopios refractores.

Cuando la luz del objeto llega a este espejo desde el “infinito”, es reflejada para formar una imagen en el *foco* del espejo f_o (Figura 5). Debido a que el foco primario está frente al espejo, no se puede analizar dicha imagen en el foco colocando una pantalla, ya que al hacer esto se bloquearía la llegada de luz al espejo. En consecuencia, se utilizan espejos pequeños adicionales para redirigir la luz a otro punto.

La principal ventaja de los telescopios reflectores es que carecen de aberración cromática; sin embargo, presentan aberración esférica. La forma en que se colocan espejos extra y la lente ocular es lo que caracteriza a los diferentes tipos de telescopios reflectores.

A) TELESCOPIO NEWTONIANO.

Este tipo de telescopio reflector utiliza un espejo plano de un tamaño pequeño (una fracción del diámetro del espejo cóncavo principal) colocado frente al espejo principal un poco antes de su foco (Figura 6) y a 45° de su eje, de forma que desvíe todos los rayos de luz, reflejados hacia el foco del espejo principal, en una dirección ortogonal al eje del telescopio, donde se encontrará la lente ocular. Para poder implementar este telescopio, por lo común, se coloca el espejo principal en el fondo de un tubo, mientras que el espejo plano se monta a la entrada del telescopio con ayuda de una estructura muy delgada denominada “araña”.

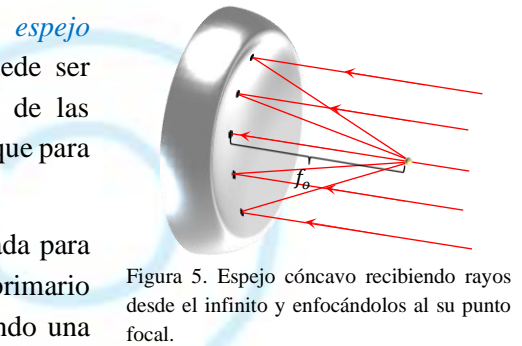


Figura 5. Espejo cóncavo recibiendo rayos desde el infinito y enfocándolos al su punto focal.

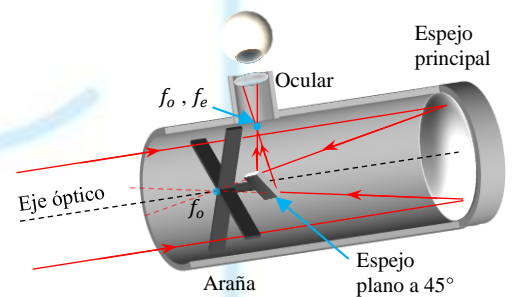


Figura 6. Diagrama de un telescopio Newtoniano típico.

El ocular se posiciona de forma que, como el caso de los telescopios Keplerianos, su foco (f_e) este muy cercano al foco (desviado a 45°) del espejo principal (f_o), de forma que la ecuación de magnificación sea la misma que la ecuación (8).

B) TELESCOPIO CASSEGRAIN.

Los *telescopios Cassegrain* usan un espejo parabólico cóncavo principal, pero con la particularidad de que tiene una apertura en su parte central (Figura 7). A diferencia del Newtoniano, en lugar del espejo plano, cuenta con un segundo espejo convexo (*espejo secundario*) colocado en el eje del espejo primario y antes de su foco.

La forma convexa del espejo secundario hace que los rayos de luz provenientes del primario se reflejen hacia la apertura del espejo primario, pero asegurando que los rayos reflejados se enfoquen por detrás del primario, que es donde se encontrará el ocular. Dado que el espejo secundario es convexo (negativo), introducirá una cierta divergencia a los rayos, produciendo una longitud focal mayor del telescopio.

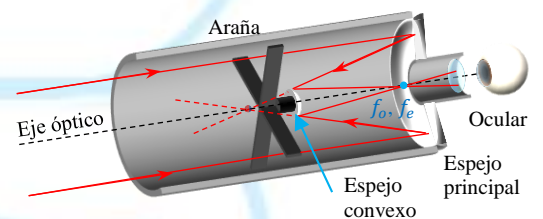


Figura 7. Diagrama de un telescopio Cassegrain típico.

Aun así, se sigue cumpliendo que el lente ocular se coloca de forma que su foco (f_e) se encuentre muy cerca del foco del espejo primario (f_o), lo cual permite utilizar la ecuación (3) para calcular la magnificación.

La principal ventaja de este arreglo es que permite hacer al telescopio más manejable que un Newtoniano. Sin embargo, genera una imagen invertida.

3 INCERTIDUMBRES EN MEDICIONES DIRECTAS Y ÚNICAS.

Otra característica importante de los telescopios es su **Numero F** ^[3, 4, 5]. Esta cantidad relaciona el diámetro de apertura de un telescopio (generalmente el diámetro del espejo principal u objetivo) con la longitud focal del objetivo o espejo principal. Por ejemplo, si el diámetro de apertura (D) de un telescopio es 1/8 de su longitud focal (f), el numero F es 8. En términos generales:

$$\#F = \frac{f}{D} \quad (10)$$

El *número F* , es comúnmente utilizado para cuantificar que tan "rápido" es un telescopio cuando se usa para tomar fotografías, o cuanta luz capta el telescopio. Entre más pequeño sea este número, la rapidez es mayor. Por ejemplo, un telescopio reflector de 150mm de diámetro y una longitud focal de 1200mm tendrá un $F=8$; mientras que uno con distancia focal de 750mm y 130mm de apertura tiene $F=5.8$; por lo que el primero es más lento (o tiene menor capacidad) para fotografiar objetos con baja irradiancia; es decir, si utilizamos estos telescopios para tomar una fotografía de un planeta, el que tiene $F=8$ captará menos luz, por lo que requerirá de un mayor tiempo de exposición.

4 REFERENCIAS.

- [1] R.A. Serway, R.J. Beichner. "Física para ciencias e ingeniería". 5° edición, McGraw-Hill. 2002
- [2] E. Hecht. "Óptica". 3° edición. Addison Wesley. 2000
- [3] E. Chaisson, S. McMillan. "Astronomy Today". 4° edición. Prentice Hall. 2002
- [4] D.L. Moché. "Astronomy a self teaching guide". 7° edición. Wiley. 2009.
- [5] V. Aupí. "Fotografiar el cielo". Geo Planeta. 1999..