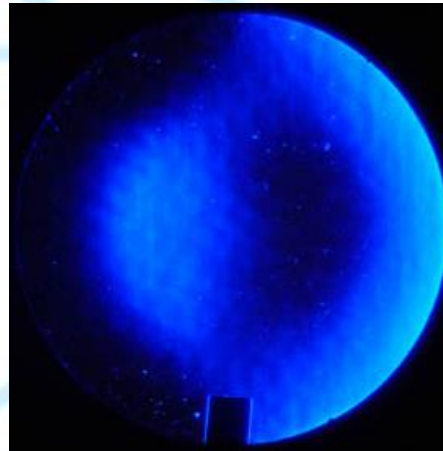


PRUEBA DE LA NAVAJA DE FOUCAULT



Erick Barrios Barocio.
Óptica v.2025

Existen muchas aplicaciones de los espejos cóncavos (por ejemplo, en telescopios) en las que se necesita cierta geometría de superficie particular (esférica o parabólica) de forma precisa, de lo contrario, las aberraciones en la superficie serán perjudiciales para obtener imágenes de calidad. El físico francés Michael Foucault propuso un método sencillo para poder caracterizar cualitativamente la forma de la superficie de un espejo y poder hacer correcciones en su construcción. Actualmente este método es muy utilizado en la construcción de espejos de telescopios para asegurar que tengan una forma adecuada.

Contenido

1	ECUACIÓN DEL ESPEJO ESFÉRICO	1
2	ESPEJOS ESFÉRICOS VS PARABÓLICOS.....	1
3	PRUEBA DE LA NAVAJA	3
4	IMPLEMENTACIÓN PRÁCTICA.....	5
4.1	Prueba en un espejo esférico.....	5
4.2	Prueba en un espejo parabólico.....	5
4.3	Prueba de espejos con geometría desconocida.....	6

1 ECUACIÓN DEL ESPEJO ESFÉRICO

La ecuación que describe el funcionamiento de un espejo esférico bajo la aproximación paraxial es:

$$\frac{1}{o} + \frac{1}{i} = \frac{2}{R} = \frac{1}{f} \quad (1)$$

Donde o es la distancia del espejo al objeto, i es la distancia del espejo a la imagen, R es el radio de curvatura y f es el foco del espejo. Es importante recordar que en la aproximación paraxial el vértice del espejo (V) y la proyección de algún punto cerca de su orilla (P) sobre el eje óptico (Q) están muy cerca entre ellos de forma que esta diferencia se puede despreciar ($\overline{QV} \approx 0$). Esto equivale a decir que el centro de curvatura (C) del espejo es mucho mayor que su diámetro transversal (Figura 1).

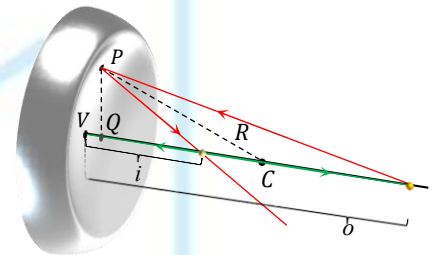


Figura 1. Geometría de un espejo esférico.

2 ESPEJOS ESFÉRICOS VS PARABÓLICOS

Como sus nombres lo indican, las superficies de estos espejos tiene forma de la sección de una esfera o de un paraboloide. Los espejos esféricos son más comunes debido a que su construcción es relativamente sencilla y económica; sin embargo, presentan *aberraciones*, las cuales son más notorias para radios de curvatura pequeños. Los orígenes de estas aberraciones pueden ser entendidas y visualizadas en un corte transversal de un espejo esférico cóncavo (Figura 2), frente al cual hay una fuente puntual sobre su eje óptico.

En el caso de la Figura 2a, el radio de curvatura del espejo es pequeño y menor a su diámetro (D), es decir, no cumple la aproximación paraxial. Si el objeto (O) es colocado muy cerca de C , de acuerdo con la ecuación (1), los rayos que salgan de él incidirán en el espejo (esférico) de forma casi normal, reflejándose hacia un punto muy cerca del radio de curvatura y generando una imagen puntual (I) sin aberraciones. Sin embargo, esta situación no es útil en un telescopio.

Si ahora movemos el objeto a una distancia muy lejana del espejo como en la Figura 2b, la ecuación (1) indica que la imagen se encontrará muy cerca del foco (f) del espejo; sin embargo, si analizamos todo el espejo, veremos que los rayos cerca del vértice (o del eje óptico) si cumplirán con la predicción, pero los rayos cercanos a la orilla del espejo se reflejarán siguiendo la ley de reflexión y no se dirigirán hacia el foco, lo cual es fácil de reconocer ya que la normal del espejo es la que siempre apunta a C (Figura 2c).

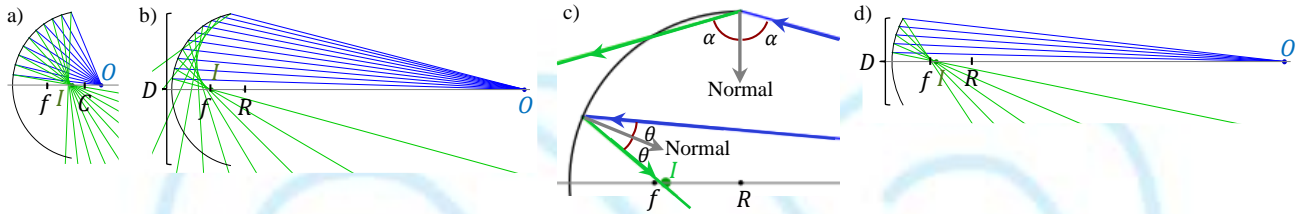


Figura 2. a) Si el objeto está cerca de C , la imagen también se encontrará cerca de C , y la aberración en la imagen es mínima. b) En regiones alejadas del eje de un espejo esférico, los rayos reflejados dejan de converger en un punto, c) esto debido a que la dirección de la normal siempre apunta al centro de curvatura. d) La aproximación paraxial de la sección esférica solo es válida en vecindades cercanas al vértice del espejo.

Para resolver este problema, lo más sencillo es tomar solamente los rayos que estén cerca del eje óptico, es decir, que el diámetro del espejo sea menor que su radio de curvatura (Figura 2d), ya que los rayos incidentes estarán en la región de aproximación paraxial y se reflejarán convergiendo en una región prácticamente puntual correspondiente a la predicción dada por la ecuación (1).

En consecuencia, *en un espejo esférico los objetos colocados cerca de su centro de curvatura se enfocarán de forma correcta, mientras que los objetos lejanos no*, lo cual es llamado *aberración esférica*.

Visto desde otra perspectiva (Figura 3a), orientada a el uso de espejos en telescopios, en un espejo con aberración esférica, los rayos que incidan en su parte externa (o perimetral) desde el infinito, serán reflejados hacia un cierto punto focal cercano al espejo; mientras que los rayos que incidan en su parte interna (cerca del eje óptico) se reflejarán hacia un punto (foco) más alejado del espejo. Esto significa que cada zona del espejo tendrá un punto focal distinto para objetos en el infinito.

Una forma de arreglar la aberración esférica entre los rayos externos e internos en el diagrama de la Figura 3a, sería separando el espejo en dos regiones, una central y otra externa (anular), y desplazando la región central hacia atrás sobre el eje óptico de forma que los dos focos se superpongan (Figura 3b). En el límite de separar el espejo en regiones anulares infinitesimales, para todos los rayos que inciden en el espejo, se obtiene una superficie parabólica.

Los *espejos parabólicos* (con forma de paraboloide) tienen la principal característica de que, por definición geométrica de la parábola, los rayos provenientes desde infinito y que llegan al espejo paralelos a su eje óptico, se reflejarán hacia su punto común llamado *foco* (Figura 4a).

Sin embargo, si colocamos una fuente puntual a una distancia de $2f$ (“centro de curvatura” del espejo según la ecuación (1)), la imagen no se enfocara adecuadamente. Estará aberrada, ya que las normales de la superficie no apuntarán todas hacia el mismo punto. En este caso, *en un espejo parabólico, los objetos colocados muy lejos de su foco se enfocarán de forma correcta, mientras que objetos cercanos a el no*. Debido a esta característica, éste tipo de espejos, son los más recomendados para telescopios. Sin embargo, su construcción es más demandante, de ahí que el precio de telescopios con este tipo de espejos sea elevado.

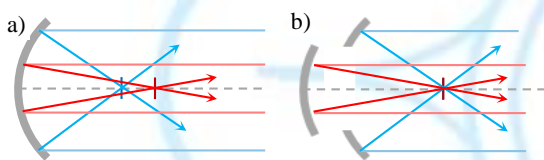


Figura 3. a) Situación de un espejo esférico en el que inciden rayos paralelos. La aberración produce distintos puntos de enfoque. b) Superposición de los focos por desplazamiento de las regiones del espejo sobre el eje óptico.

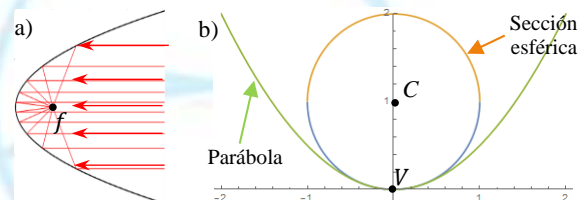


Figura 4. a) Por la definición de una parábola, los rayos que inciden de forma paralela al eje de la misma, se reflejan hacia un punto en común llamado foco. b) Bajo la aproximación paraxial, la curvatura de una sección esférica aproxima a la curvatura de un paraboloide.

A pesar de lo anterior, los espejos esféricos pueden funcionar de forma aceptable ya que aproximan a un espejo parabólico cerca del vértice (Figura 4b) para radios de curvatura grandes, y entre más grande sea el radio de curvatura, la región de aproximación será mayor.

3 PRUEBA DE LA NAVAJA

Conocer cómo es la forma de la superficie de un espejo es muy importante para utilizarlo adecuadamente. Uno de los métodos más sencillos y accesibles para conocer esta información es el de la *Prueba de la Navaja*. Este método, fue ideado por el científico francés León Foucault, con el objetivo de caracterizar de forma cualitativa la forma de la superficie de los espejos. Este método es muy utilizado en el proceso de pulido de espejos para telescopios con el objetivo de hacer correcciones a la forma del mismo.

Asumamos que tenemos un espejo cóncavo (sin especificar su forma particular) en el cual se reflejan cuatro rayos de luz (dos externos y dos internos) que se enfocan en un solo punto ideal, sin aberración e infinitamente pequeño (P); además, a la izquierda de este punto de enfoque colocamos una navaja de afeitar de forma vertical (Figura 5). Como podemos observar, después de que los rayos convergen en P , divergen como saliendo de él, notando que los rayos provenientes de la parte derecha del espejo ahora se encuentran a la izquierda del eje óptico y viceversa.

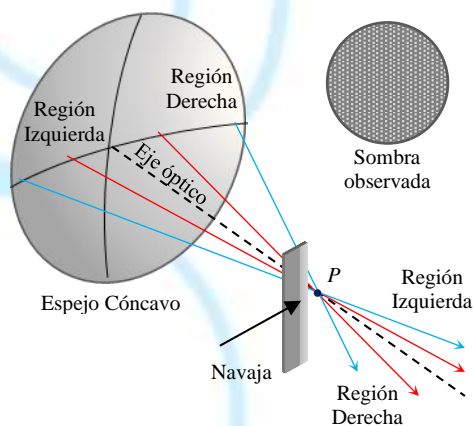


Figura 5. Disposición para la prueba de la navaja. Arriba Derecha: Cuando la navaja cruza justo en el punto de enfoque, todo el espejo se oscurece de forma uniforme y simultánea.

Si colocamos nuestro ojo sobre el eje óptico del espejo justo pasando y muy cerca del punto de enfoque, lo que observaremos es que el espejo está completamente y uniformemente iluminado de luz, ya que todos los rayos provenientes del espejo llegaran a nuestro ojo. Si movemos la navaja desde la izquierda, muy lentamente, hasta que su borde comience a obstruir la luz justo en P , la intensidad de cada haz de luz del espejo se reduce por igual y simultáneamente (bloquea todos los rayos en P al mismo tiempo), y el espejo se oscurece (“atenúa” su luminosidad) de forma uniforme en toda su área, denominándose *punto nulo*.

Ahora consideremos la situación de la Figura 6a, donde la navaja está más cerca del espejo (antes de llegar al punto de enfoque) y nuevamente se mueve de izquierda a derecha de forma paulatina. Conforme se acerca al eje óptico ira bloqueando los rayos de luz provenientes del lado izquierdo del espejo de uno por uno, y observaremos la sombra de la navaja entrar desde el lado izquierdo moviéndose hacia la derecha.

En otra situación (Figura 6b), colocamos la navaja adelante del punto de enfoque. Al mover la navaja hacia el eje óptico desde la izquierda, ahora observaremos que la mitad derecha del espejo es la que se oscurece a pesar de que la navaja se encuentra del otro lado, además la sombra se mueve de derecha a izquierda. Este efecto es consecuencia de que

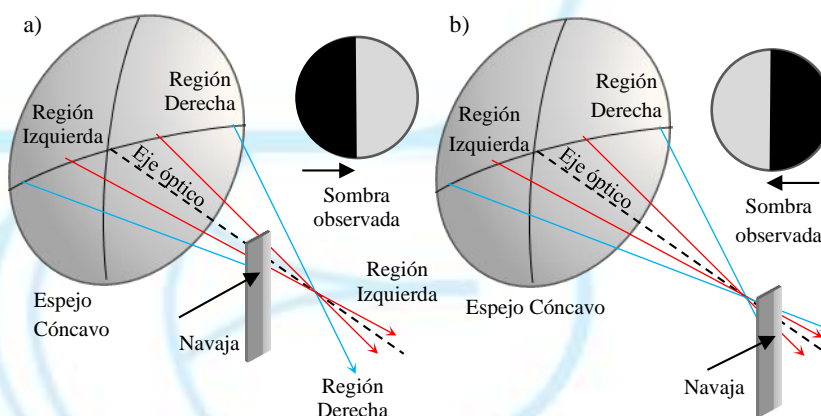


Figura 6. a) Disposición de la navaja antes del punto de enfoque, conforme la navaja cruza el eje óptico, el espejo se oscurece de forma paulatina desde la izquierda. b) Disposición de la navaja después del punto de enfoque, conforme la navaja cruza el eje óptico, el espejo se oscurece de forma paulatina desde la derecha.

los rayos de luz invierten posición después de cruzar el punto de enfoque. De esta forma la sombra de la navaja puede decirnos si estamos antes (o dentro), después (o fuera) o exactamente en el punto de enfoque del espejo.

Ahora, supongamos que el espejo sufre de aberración, y los rayos centrales se enfocan en una posición distinta a los externos (Figura 7a). En esta situación, analizaremos tres posiciones con ayuda de la navaja entrando desde la izquierda y observando cómo se dan las sombras vistas desde un punto en el eje óptico.

En la primera posición, la navaja encuentra primero los rayos externos provenientes de la parte izquierda del espejo (los cuales se enfocan más adelante) y los obstruye, esto produce que en la parte anular del espejo de donde salen estos rayos se observe una sombra oscura moviéndose de izquierda a derecha; cuando la navaja llega al eje óptico, la mitad izquierda del anillo está cubierta por la sombra. Por otro lado, cuando la navaja cruza el eje óptico, donde se enfocan los rayos provenientes de la parte central del espejo, se observará que la intensidad de luz proveniente de esta región se atenuará (casi a la mitad) de forma simultánea en toda esta región (Figura 7b), es decir, hemos detectado el punto de enfoque de la parte central del espejo.

Como segundo caso, colocamos la navaja en la segunda posición, que está entre los dos puntos de enfoque, adelante del punto de enfoque de la parte central y antes del punto de enfoque de la parte anular externa. La navaja se vuelve a desplazar desde la izquierda y comienza a obstruir los rayos de luz más a la izquierda que regresan del espejo (tanto de la parte central como de la externa). Sin embargo, la diferencia radica en que la navaja cubre ahora los rayos provenientes de la parte interna y derecha del espejo (ya que la navaja está después del punto de enfoque) y a la vez cubre los rayos provenientes de la parte izquierda y externa del espejo. Esto produce que la región anular externa del espejo se vaya cubriendo desde la izquierda por la sombra de la navaja (como en el caso anterior), pero, en la región central del espejo, la sombra vaya cubriendo esta zona desde la derecha. Justo cuando la navaja llega al eje óptico, la mitad región central del espejo estará cubierta por una sombra desde la derecha, mientras que la mitad de la región externa del espejo estará cubierta por la sombra desde la izquierda (Figura 7c).

Finalmente colocamos la navaja en la tercera posición, volviendo a desplazarla desde la izquierda. A medida que avanza desde la izquierda, la navaja bloquea los rayos provenientes del lado derecho del espejo, por lo que en la región central del espejo se observa una sombra que cubre el espejo desde el lado derecho. Sin embargo, cuando la navaja llega al eje óptico y cubre el segundo punto de enfoque, correspondiente a la región anular externa del espejo, esta región anular se cubrirá de forma simultánea y atenuará a la mitad de su intensidad (Figura 7d). Es decir, se ha detectado el punto de enfoque de la región externa del espejo.

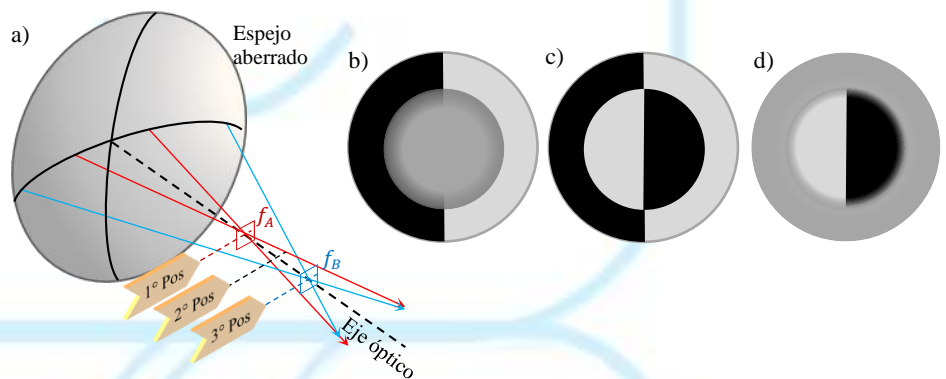


Figura 7. a) Espejo aberrado con dos puntos de enfoque (A y B). La posición de enfoque de cada región del espejo se marca con un cuadrado. b) Distribución de sombras observadas cuando la navaja cruza el eje óptico en la primera posición. c) Distribución de sombras en el espejo cuando la navaja está entre los dos puntos de enfoque. d) Distribución de sombras cuando la navaja cruza el eje óptico en la tercer posición.

4 IMPLEMENTACIÓN PRÁCTICA

Para llevar a cabo la prueba de la navaja, es indispensable una fuente puntual, ya que produce un punto de enfoque muy pequeño que se aproxima al caso ideal. De igual forma, de lo visto anteriormente, la fuente puntual se debería colocar sobre el eje óptico del espejo para que los puntos de enfoque también se encuentren sobre el eje, sin embargo, esto no es posible de forma práctica ya que la fuente interferiría con los rayos reflejados y no permitiría observar el espejo. Para evitar este problema, la fuente puntual se coloca ligeramente fuera del eje de forma que los puntos de enfoque también salgan ligeramente del eje (Figura 8), por lo que el punto de observación también se desplazará siguiendo al punto de enfoque.

4.1 PRUEBA EN UN ESPEJO ESFÉRICO.

En el caso de espejos esféricos, existen dos formas de llevar a cabo la prueba. La primera es colocando la fuente puntual muy cerca de su centro de curvatura (Figura 9a); de acuerdo con la ecuación (1), el punto de enfoque se encontrará junto a la fuente. Si llevamos a cabo la prueba de la navaja, lo que esperaríamos es que, al tratarse de un espejo esférico, cuando la navaja cruce el punto de enfoque, la intensidad de la luz reflejada en todo el espejo se atenuará de forma simultánea y homogénea, o si la navaja está antes o después del punto de enfoque, que la sombra de la navaja cubra el espejo paulatinamente desde la izquierda o la derecha respectivamente. Si lo anterior no ocurre, el espejo no es esférico.

La segunda forma es colocando la fuente puntual muy lejos del espejo de forma que el punto de enfoque se encuentre en el foco del espejo (Figura 9b). En este caso, si el espejo es esférico, presentará aberración esférica y tendrá varios puntos de enfoque. Al realizar la prueba, se observará que una región anular del espejo (no necesariamente la central o la externa) presentará la atenuación del punto nulo, pero en las demás regiones, se observarán las sombras definidas de la navaja recorriendo el espejo. Si esto no se observa, probablemente el espejo no sea esférico.

De estas dos formas, la primera es la más recomendada, ya que la distribución de sombras observada en la segunda no es única de un espejo esférico, por lo que no es conclusiva para catalogarlo como tal.

4.2 PRUEBA EN UN ESPEJO PARABÓLICO.

Por la definición del espejo parabólico, la mejor forma de realizar esta prueba es colocando la fuente puntual muy lejos del espejo. Al realizar la prueba en esta disposición, dado que todos los rayos se concentrarán en el foco, cuando la navaja cruce este punto, se observará que la intensidad de la luz reflejada en todo el espejo se atenuará de forma simultánea y homogénea.

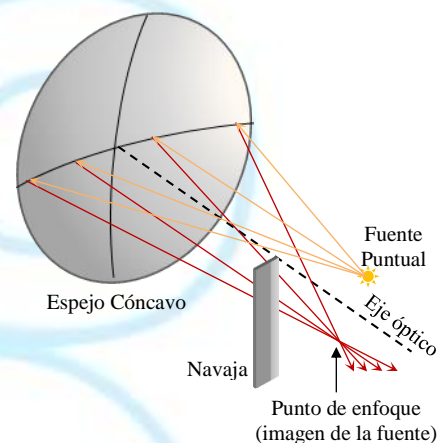


Figura 8. Disposición práctica para la Prueba de la Navaja con una fuente puntual.

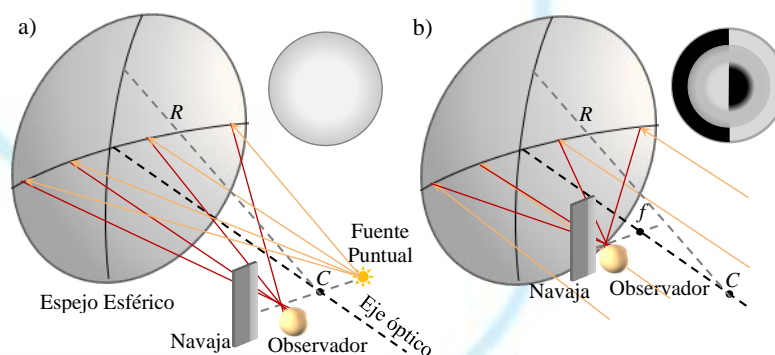


Figura 9. a) Disposición práctica para la Prueba de la Navaja con una fuente puntual en el centro de curvatura de un espejo esférico. b) Disposición práctica para la Prueba de la Navaja con la navaja en el foco del espejo esférico.

Por otro lado, si colocamos la fuente cerca del centro de curvatura o del foco, se observará una distribución de regiones de sombras, ya que los rayos se enfocarán por regiones. La región anular donde la intensidad se atenúe de forma homogénea será la posición focal de esa región.

Es decir, lo que se observa en el caso parabólico es completamente opuesto a los que se observa con un espejo esférico.

4.3 PRUEBA DE ESPEJOS CON GEOMETRÍA DESCONOCIDA.

Para el caso de espejos de los que desconocemos la geometría de su superficie, lo mejor es colocar la fuente puntual cerca de su centro de curvatura, el cual corresponde a la posición de la fuente puntual que produce una imagen justo a la misma distancia que la fuente puntual, como en la Figura 9a. De esta forma se realizará la prueba como si se tratara de un espejo esférico.

Observando el comportamiento de las sombras será posible tener una idea de la localización de los puntos de enfoque de las distintas regiones del espejo. En este caso la prueba se debe realizar a distintas posiciones de la navaja para buscar distintos puntos de enfoque.