

# ESPEJOS LÍQUIDOS



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

Los espejos parabólicos son los más adecuados para aplicaciones donde los objetos están lejos del espejo, por ejemplo, para telescopios. Sin embargo, su construcción en materiales rígidos como vidrio es técnicamente complicada, por lo que se requieren formas alternativas más sencillas para poder producirlos, a costa de ciertas limitantes en su uso. El desarrollo de estas alternativas puede reducir costos, lo cual puede beneficiar a la investigación y enseñanza.

## Contenido

1	LÍQUIDOS Y GRAVEDAD .....	1
2	TELESCOPIOS CON ESPEJOS LÍQUIDOS.....	3
3	REFERENCIAS.....	4

## 1 LÍQUIDOS Y GRAVEDAD

Todos los líquidos reflejan en cierta medida los rayos de luz que llegan a su superficie. En particular, cuando se encuentran en reposo, y sin perturbaciones, formarán una superficie plana la cual reflejará la luz como si se tratara de un espejo plano (Figura 1). En base a esta experiencia, es posible utilizar líquidos para generar espejos planos e incluso espejos cóncavos.

Para generar un espejo cóncavo se puede utilizar un recipiente cilíndrico (cacerola) con líquido reflejante (por ejemplo, agua con jabón o aceite). Si ponemos a rotar de forma controlada el recipiente (por ejemplo con un motor y un sistema de tornamesa), la superficie del líquido cambiará su geometría debido a la fuerza centrífuga que experimenta, produciendo una superficie curva. Dado que la superficie refleja la luz, generará un espejo cóncavo cuya distancia focal estará determinada por la rapidez de rotación de la cacerola (una rapidez alta hará que la pendiente de la superficie de agua sea grande, produciendo una longitud focal corta), y dependiendo de la distancia de la superficie (espejo) a un objeto de intensidad luminosa alta, se podrá proyectar una imagen real en una pantalla (Figura 2), como en el caso de un espejo común. Sin embargo, es importante notar que dada la posición de la superficie, tanto la pantalla como el objeto deben estar cerca del eje del espejo, el cual apunta en dirección vertical.

Para encontrar la relación entre el foco de la superficie y la rapidez de giro, se debe recordar que *en un fluido la superficie siempre es perpendicular a la suma de todas las fuerzas externas que actúan sobre el fluido*. El líquido en una cacerola que no rota tiene una superficie horizontal ya que la única fuerza que actúa sobre toda la superficie es la gravedad, la cual apunta hacia abajo. Cuando la cacerola gira a una rapidez angular constante ( $\omega$  medida en rad/s), aparece una fuerza centrífuga cuya adición vectorial con la fuerza de gravedad determina la forma de la superficie.

Cualquier elemento infinitesimal de masa  $dm$  en la superficie del líquido se moverá en un círculo de radio constante ( $r$ ) medido desde el eje de giro de la cacerola. Este elemento infinitesimal dará una revolución en un tiempo  $T$ , por lo que la velocidad angular será

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (1)$$

Asegurando que el centro de la cacerola está en el eje de rotación (Figura 3), la fuerza centrífuga en el elemento infinitesimal de líquido será

$$F_C = m\omega^2 r,$$



Figura 1. Cuando la superficie de un lago está totalmente estática, se comportará como un espejo plano.

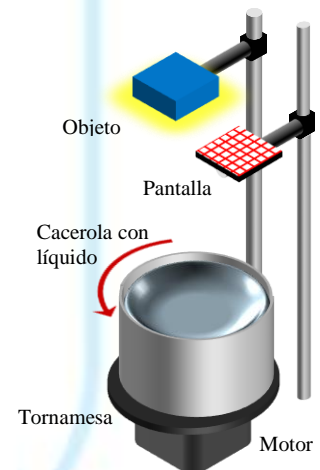


Figura 2. Diagrama del arreglo experimental para generar un espejo líquido.

la cual apunta en dirección radial alejándose del eje de rotación, mientras que la fuerza de gravedad será

$$F_g = mg,$$

la cual apunta hacia abajo. De estas dos expresiones, se puede encontrar el ángulo respecto a la vertical de la fuerza resultante, y el cual también es la pendiente de la superficie del líquido a la distancia  $r$  del eje podrá expresarse como

$$\tan \alpha = \frac{\omega^2 r}{g}$$

Si la rapidez de giro es lenta (del orden de decenas de revoluciones por minuto), podemos asumir que la superficie estará lo suficientemente abierta como para ser aproximada como esférica. Bajo esta aproximación la pendiente ( $\alpha$ ) y el radio de curvatura ( $R$ ) estarán relacionados por

$$\tan \alpha = \frac{r}{R - x}$$

De esta forma se llega a la relación

$$R - x = \frac{g}{\omega^2}. \quad (2)$$

Sí la curvatura de la superficie es muy ligera, es de esperar que el radio de curvatura sea mucho más grande que la diferencia de alturas entre la orilla y el centro de la superficie del líquido, por lo que podemos hacer otra aproximación donde  $R \gg x$ , lo cual lleva a

$$R \approx \frac{g}{\omega^2} \quad (3)$$

Esta relación muestra que el radio de curvatura (o la distancia focal) puede ser ajustada variando la rapidez de rotación. Combinando este resultado con la ecuación (1) obtenemos que

$$R \approx \frac{gT^2}{4\pi^2} \quad (4)$$

Finalmente podemos incluir la ecuación (4) en la ecuación de los espejos:

$$\frac{1}{o} + \frac{1}{i} = \frac{2}{R} = \frac{8\pi^2}{gT^2} \quad (5)$$

Esta relación es importante ya que posibilita dos cosas. Por un lado, permite generar un espejo cóncavo líquido de distancia focal variable simplemente controlando la rapidez de giro; por otro lado, para un cierto periodo de rotación conocido, se puede encontrar el valor de  $g$  en el lugar donde se encuentra el espejo simplemente buscando la posición de una imagen ( $i$ ) a partir de un objeto ( $o$ ).

Finalmente es importante mencionar que el problema más común, para generar un espejo líquido, es mantener la estabilidad de la superficie mientras gira, lo cual es importante ya que cualquier tipo de vibraciones en el sistema hará que la superficie presente aberraciones que distorsionen las imágenes. Una forma de ayudar a reducir dichas vibraciones es utilizando líquidos viscosos (aceites), a expensas de requerir un tiempo considerable para que la superficie alcance su

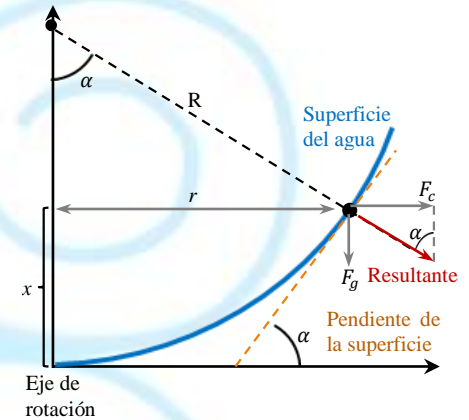


Figura 3. Diagrama de fuerzas en la superficie de un líquido rotando.



punto estable, y/o sistemas de amortiguamiento y anti-vibración los cuales son difíciles de implementar. De igual forma, lo más recomendable es utilizar líquidos altamente reflejantes.

## 2 TELESCOPIOS CON ESPEJOS LÍQUIDOS

La sencillez del sistema descrito anteriormente ha fomentado, desde hace varios años, la investigación en la aplicación de este método para telescopios<sup>[1]</sup>. En particular para la construcción de telescopios newtonianos cuyos espejos principales sean líquidos.

El primer telescopio de espejo líquido (LMT por sus siglas en inglés) se implementó en 1872 en Nueva Zelanda, y posteriormente hubo varias implementaciones alrededor del mundo; sin embargo, las dificultades tecnológicas de la época dificultaron su desarrollo.

A pesar de que por cierto tiempo el concepto pareció impráctico, últimamente el concepto ha ganado nuevo impulso pensando en su implementación en la Luna<sup>[2, 3]</sup>, cuya posibilidad ha crecido en los últimos años. En el periodo de (1995-2002), la NASA probó este tipo de telescopios con el propósito de desarrollar y mejorar la idea (Figura 4), así como también para el rastreo de basura espacial. Dicho telescopio usaba mercurio y tenía 3m de diámetro, rotando a 10 revoluciones por minuto.



Figura 4. LMT de la NASA.

El telescopio líquido más grande construido hasta la actualidad fue el LZT (Large Zenith Telescope) construido en Canadá, el cual tenía un diámetro de 6m y rotaba a 8.5 revoluciones por minuto. Fue operado entre los años 2004 – 2016 como plataforma de pruebas de viabilidad de esta propuesta de telescopios, enfocándose en sistemas de reducción de vibraciones.

En las implementaciones actuales, los espejos líquidos usan mercurio como componente reflejante principal. La principal ventaja del mercurio es su alta reflectancia y su adecuada viscosidad; sin embargo, presenta la desventaja y peligro de ser un elemento tóxico (en particular los vapores que desprende), por lo que es necesario contar con equipo de seguridad química especial.

Como se mencionó anteriormente, el principal problema para implementar estos sistemas son las vibraciones, por lo que se requieren de sistemas de amortiguamiento y anti-vibraciones complejos, lo cual eleva su costo, aunque siguen siendo viables y de menores costos en comparación con espejos de vidrio de las mismas dimensiones<sup>[4]</sup>. Otra consideración de diseño es que se debe tener una rapidez de rotación extremadamente estable para que la superficie sea lo más suave posible.

La principal limitante práctica de los telescopios basados en espejos líquidos es que solo permiten construir telescopios de zenit, es decir, que solo apuntan hacia arriba (hacia el zenit) sin poderse inclinar<sup>[5]</sup>, y lo cual los hace inadecuados para aplicaciones donde se requiera observar un objeto por periodos largos de tiempo; sin embargo, este problema se podría resolver si el sistema se construyera en el espacio o en ambientes de baja gravedad.

En 2022, se terminó de construir el ILMT (International Liquid Mirror Telescope), con sede en el Himalaya Indu, y el cual tiene un diámetro de 4m y 50 litros de mercurio<sup>[6]</sup>. La particularidad de este telescopio es que fue diseñado para ser usado como telescopio astronómico (a diferencia de los anteriores que solo eran pruebas de concepto) y

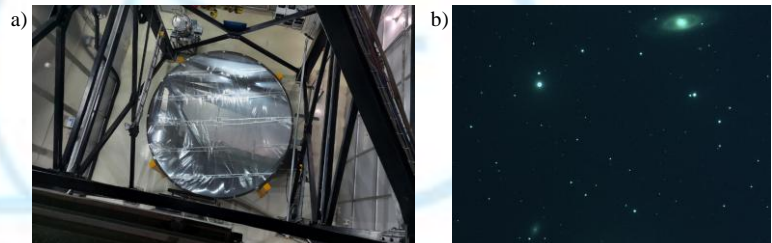


Figura 5. a) ILMT de la India. b) Fotografía obtenida con el ILMT.

como plataforma de prueba para un futuro telescopio lunar. Este telescopio cuenta con una cámara CCD de alta sensibilidad y con un sistema especial para acumular (empalmar distintas fotografías tomadas en diferentes momentos) o sustraer exposiciones (Figura 5).

### 3 REFERENCIAS.

- [1] Borra, E. F. *Liquid Mirrors*. Scientific American **270**(2):76-81. (1994).
- [2] R. Angel, D. Eisenstein, et.al., *A lunar liquid-mirror telescope (LLMT) for deep-field infrared observations near the lunar pole*. Proc.of SPIE, Vol. **6265**, 62651U-1, (2006), doi: 10.1117/12.669994.
- [3] P. Hickson. *Liquid Mirror Telescopes*. American Scientist **95**, 3 (2007), doi:10.1511/2007.65.216
- [4] P. Hickson, R. Racine, *Image quality of liquid-mirror telescopes*, PASP, **119**, 456 (2007), doi: 10.1086/517619
- [5] P. Hickson, T. Pfrommer, et.al. *The large zenith telescope: a 6-mliquid-mirror telescope*, PASP, **119**, 444, (2007), doi: 10.1086/517621
- [6] D. Clery. *Telescope in India snares light in spinning mercury*. Science **376**, 6599 (2022) . doi: 10.1126/science.add4869