

# Práctica #2

## Experimentos sencillos y simulaciones con espejos planos y esféricos

Kaled Sequeira — kaledseq@estudiantec.cr — 2020061166,

Javier Fernández — jjavierf64@estudiantec.cr — 2020425930

---

### 1. INTRODUCCIÓN

Los espejos y los reflejos han sido de gran fascinación para nuestros antepasados y se han convertido en tema de estudio por el interés que genera y sus múltiples aplicaciones. Para esta práctica se busca analizar los espejos y los reflejos desde el punto de vista cualitativo y cuantitativo.

Asimismo, en la actualidad, siguen poseyendo gran valor, tanto en la vida cotidiana como en la ciencia e ingeniería. Un ejemplo de ellos son los telescopios que utilizan espejos para su funcionamiento (telescopios reflectores) como el famoso Telescopio Hubble [1] y el recién puesto en acción Telescopio James Webb [2]; el beneficio de este tipo de telescopio frente a los que se basan en lentes, es que se elimina la aberración cromática (a costa de otro tipo de aberraciones, como la aberración esférica).

Además, es posible realizar estructuras que aprovechen la luz del sol que incide en una gran área superficial y se concentre en un punto fijo, de manera que dicho punto puede llegar a temperaturas altísimas, y de esta manera generar energía. Un ejemplo de ello es el proyecto de energía solar concentrada de la empresa SolarReserve, que utiliza más de 10.000 espejos para concentrar la energía lumínica proveniente del sol en una celda capaz de generar y almacenar grandes cantidades de energía [3].

Inclusive, con la aplicación de los espejos se

puede llegar a hacer mediciones de la velocidad de la luz, tomando un rayo que se refleja e interfiere consigo mismo, como es el caso del experimento de Fizeau [4].

El proceso de fabricación de un espejo es en realidad bastante sencillo. Únicamente se requiere tener un sustrato de vidrio liso sobre el cual aplicar una solución de nitrato puro de plata, agua con un 26% de amoniaco, sales de Rochelle y agua destilada [5]. Con ello, se crea en el vidrio una superficie reflectiva, la cual se utiliza comúnmente en la contraparte del vidrio, mientras que la parte de atrás se protege para evitar daños en la parte metálica. Dichos espejos suelen poseer un porcentaje de reflectancia de entre 77% y 82%.

Es importante resaltar que existen distintos tipos de espejos, los planos y los esféricos. Los esféricos a su vez se dividen en espejos cóncavos y convexos. Un espejo plano forma una imagen del mismo tamaño del objeto. Para múltiples aplicaciones es necesario que el objeto y la imagen sea de distinto tamaño o es deseable una imagen real, esto es posible únicamente con espejos esféricos. [6]

Los espejos esféricos se caracterizan por tener un radio de curvatura  $R$ , este es inexistente en los espejos planos. Esto les da la capacidad de aumentar o disminuir la imagen dependiendo de la distancia del objeto. [6]

Es importante definir entonces, ¿Qué es un objeto y una imagen? Se entiende por objeto

todo aquello desde donde se irradian rayos de luz. Existen objetos puntuales carentes de extensión física y los reales con longitud, anchura y altura. Dos puntos importantes para el análisis son el punto de objeto y el punto de imagen. El punto de objeto es la fuente de los rayos y el punto de imagen es la fuente aparente de los rayos reflejados. [6]

Se sabe que existen las imágenes reales y virtuales. Las imágenes virtuales son aquellas donde los rayos salientes no pasan en realidad por el punto de imagen. Pero en el caso donde los rayos salientes si pasan por el punto de imagen se denomina la imagen como una imagen real. Además de esto existen las imágenes derechas las cuales son aquellas donde la flecha imagen apunta a la misma dirección que la flecha objeto. Para simplificar un objeto se utiliza el concepto de flecha el cual indica una dimensión de este. Las imágenes invertidas son aquellas donde la flecha imagen apunta en dirección opuesta a la flecha objeto. [6]

En la formación de imágenes un espejo plano solo puede formar imágenes virtuales, estas son inversas de atrás hacia adelante. Un espejo plano forma una imagen virtual, derecha e inversa. La razón del tamaño de la imagen con respecto al tamaño del objeto se le llama aumento lateral. [6]

$$m = \frac{y'}{y} \quad (1)$$

Los espejos esféricos pueden formar una imagen mayor, menor o del mismo tamaño del objeto. Además es posible formar imágenes reales o virtuales. Para un espejo cóncavo este puede formar imágenes reales e invertidas. También en espejos cóncavos se pueden formar imágenes ampliadas o reducidas, esto depende de la posición del objeto. Para espejos convexos se forman imágenes virtuales, reducidas y derechas. [6]

El punto focal y la distancia focal ayudan a explicar los factores que determinan la formación de imágenes, el punto focal es donde los rayos paralelos incidentes convergen. La distancia del vértice al punto focal  $f$  se llama

distancia focal. Se puede relacionar con el radio de curvatura  $R$  del espejo como:

$$f = \frac{R}{2} \quad (2)$$

Por lo general se puede expresar las distancias de objeto  $s$  y de imagen  $s'$  de un espejo en términos de la distancia focal:

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f} \quad (3)$$

Se puede expresar el aumento lateral en términos de  $s$  y  $s'$  tal que:

$$m = -\frac{s'}{s} \quad (4)$$

La magnificación de una imagen es la razón entre el tamaño de la imagen y el objeto, esta corresponde al aumento lateral  $|m|$ . Para valores donde  $|m| < 1$  se dice que la imagen es una reducción con respecto a el objeto y cuando  $|m| > 1$  la imagen es un aumento con respecto al objeto.

Entonces, se puede definir que los factores que determinan cómo se forma la imagen de un objeto en un espejo esférico, son la distancia focal del espejo y la distancia del objeto respecto al vértice de este. Mientras que para el caso de la formación de la imagen en un espejo plano, se mantendrá igual sin importar la distancia del objeto respecto al espejo, es decir que se tendrá una relación de 1:1.

Un aspecto importante en el estudio de la óptica geométrica es una consideración de los signos congruentes en los sistemas a estudiar, de manera que se define:

Los principales rayos que se trazan en el análisis por método gráfico para espejos esféricos son los siguientes [6]:

- **Paralelo al eje.** Que al reflejarse en el espejo pasa a través del punto focal (en el caso del espejo cóncavo), o parece que proviene del punto focal (en el caso del espejo convexo).
- **Incidente en el punto focal.** Pasa a través del punto focal o se dirige al mismo. Al reflejarse resulta paralelo al eje.

Cuadro 1: Convenio de Signos para espejos esféricos [7].

Cantidad	Signo	
	+	-
$s_o$	A la izquierda de $V$ , objeto real	A la derecha de $V$ , objeto virtual
$s_i$	A la izquierda de $V$ , imagen real	A la derecha de $V$ , imagen virtual
$f$	Espejo cóncavo	Espejo convexo
$R$	$C$ a la derecha de $V$ , espejo convexo	$C$ a la izquierda de $V$ , espejo cóncavo
$y_o$	Por encima del eje, objeto derecho	Por debajo del eje, objeto invertido
$y_i$	Por encima del eje, imagen derecha	Por debajo del eje, imagen invertida

- A lo largo del radio.** Que pasa por el centro de curvatura e interseca precisamente en la dirección de la normal de la superficie del espejo y se refleja justamente en dirección contraria.
- Incidente en el vértice.** Que se refleja de manera que cumple con la ley de reflexión para espejos planos, de que el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión.

Esta práctica se divide en dos secciones la cuantitativa y la cualitativa. La práctica tiene como objetivo general realizar ensayos por simulación computacional y experimentos sencillos para comprender los principios de la formación de imágenes en espejos planos y esféricos. Como objetivos específicos en la parte cualitativa se tiene realizar ensayos experimentales sobre la formación de imágenes en superficies planas y curvas con recursos sencillos. La cuantitativa tiene como objetivos conocer los tipos de imágenes que se pueden producir con espejos planos y esféricos, y realizar ensayos por simulación computacional que permitan comprobar las ecuaciones de formación de las

imágenes por espejos esféricos.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para la realización del experimento se utilizó la plataforma virtual oPhysics, programada en el software Geogebra por Tom Walsh. Dicha plataforma contiene varias simulaciones en ámbitos de física y es de acceso público y libre por medio del portal <https://ophysics.com/>.

Asimismo, se utilizó la plataforma creada por Vladimír Vaščák de Physics at School, por el medio <https://www.vascak.cz/>, tanto para las simulaciones de espejos cóncavos como convexos.

Las fotografías de la parte cualitativa fueron tomadas con un teléfono celular. Tomando las fotografías se siguió el procedimiento dado en la práctica 2.1. El análisis de las fotos tomadas en la parte cualitativa de la práctica se utilizó el software de edición de fotografía GIMP el cual posee características similares a Photoshop pero es de acceso libre.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para esta práctica 2 se realizó primero la sección cualitativa donde se observaba el fenómeno sin conocer la teoría a profundidad para asociar como es el fenómeno en la realidad y posteriormente en la sección cuantitativa analizarlo a fondo. Primero se realizó el montaje propuesto con 6 vasos iguales, alineados y equidistantes en una mesa. Se quería comprobar si al colocar un espejo plano en medio del conjunto se aprecia la misma imagen que cuando el espejo no estaba. Esto para garantizar que las imágenes del espejo no están aumentadas. Se puede apreciar esto en las figuras 1 y 2 .

Superponiendo ambas fotografías se puede observar en la figura 3 la comparativa. Podemos decir que se aprecia la misma imagen con o sin espejo. Las imágenes no calzan perfectamente pero este se debe a que para tomar las fotografías no se contaba con el equipo adecuado por lo que si se observa a detalle varía la posición de la mesa levemente.



Figura 1: Prueba del montaje propuesto para los vasos con el espejo.



Figura 2: Prueba del montaje propuesto para los vasos sin el espejo.

Se puede determinar entonces que mediante análisis de las fotografías las imágenes producidas no son aumentadas ni disminuidas y la magnificación.

En la siguiente sección del procedimiento se buscaba producir imágenes de los tipos que permiten los espejos cóncavos y convexos. A continuación se muestran las figuras de los distintos tipos de imágenes, como objeto se utilizó el teléfono celular. En la figura 4 se muestran los 3 espejos y su efecto en la magnificación de una imagen virtual, en el espejo convexo se ve el objeto con aumento, en el cóncavo se observa una disminución y por último en el plano se observa con una magnificación de 1.

Con las condiciones que se tenían en el

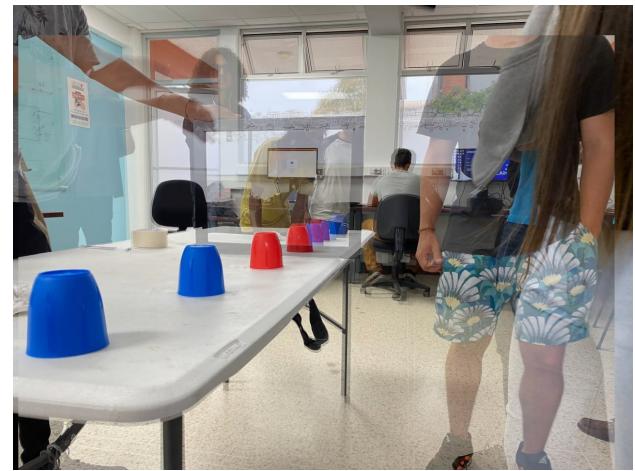


Figura 3: Prueba comparativa del montaje propuesto para los vasos.



Figura 4: Prueba comparativa de los tipos de espejos.

laboratorio era difícil generar una imagen real para hacer la prueba por lo que se generó una prueba únicamente, ahora se puede analizar para determinar si era una imagen real disminuida o aumentada analizando la distancia de imagen  $s'$  y la distancia de objeto  $s$ . La distancia de objeto corresponde a 20 cm y la distancia de imagen a 170 cm. Haciendo entonces el cálculo correspondiente:

$$m = -\frac{170}{20} = -8,5 \quad (5)$$

Comprobando la magnificación  $|m| > 1$  la imagen formada en realidad es aumentada con

respecto al objeto.

En cuanto a las simulaciones realizadas, para un espejo cóncavo, se tomaron mediciones de la imagen generada de un objeto a ciertas distancias para dos distancias focales distintas de 3 y 5 cm. Un ejemplo, y comprobación, de la utilización de la herramienta de simulación se observa en la Figura 5.

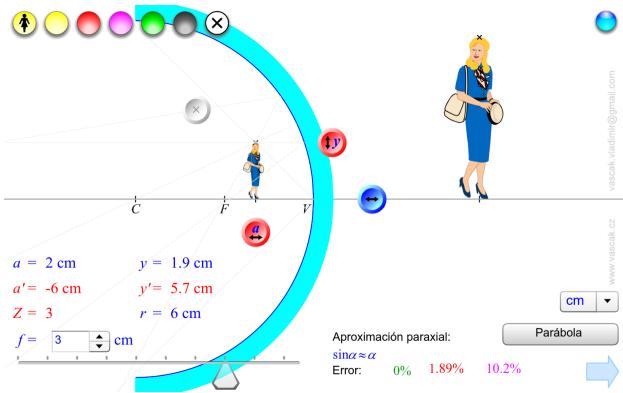


Figura 5: Utilización de la plataforma de simulación.

Los datos recolectados se presentan en el Cuadro 2.

Cuadro 2: Mediciones de la distancia de la imagen de un objeto en un espejo cóncavo.

Distancia de $s_o$ [cm]	Distancia de $s_i$ [cm] con $f$ de 3cm	Distancia de $s_i$ [cm] con $f$ de 5cm
2.0	-6.0	-3.3
4.0	12.0	-20.0
6.0	6.0	30.0
8.0	4.8	13.3
10.0	4.3	10.0

Otras observaciones que se realizaron fue que para el caso del espejo de distancia focal 3cm, al colocar el objeto a los 2cm se notaba una imagen derecha y aumentada, mientras que a las mediciones mayores, la imagen se invierte. Si el objeto se coloca a los 4cm también se encuentra aumentada; si se coloca a los 6cm, éste se encuentra a una proporción de 1:1; y si se coloca a 8 o a 10 cm, entonces se observa disminuida. Ocurre similarmente para el caso del espejo de distancia focal de 5cm, que en las mediciones de 2 y 4 cm se observa derecho y aumentado; las mediciones de 6 y 8 cm muestran una imagen invertida y aumentada;

y a los 10cm se muestra una imagen invertida con proporción de 1.

Además, para el caso de los espejos convexos, se procedió de igual manera que en el caso anterior, pero considerando los datos en la simulación de espejos convexos. Asimismo, se adjunta en la Figura 6 un ejemplo de la simulación utilizada.

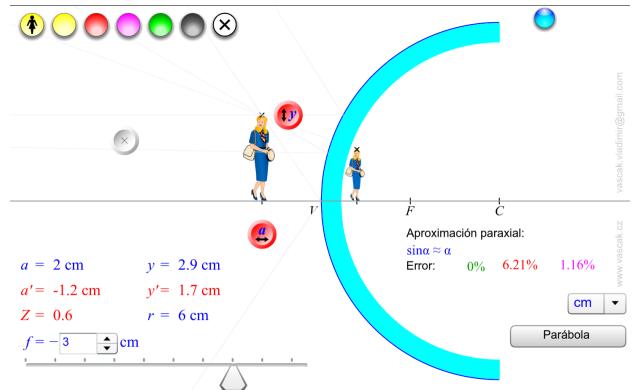


Figura 6: Utilización de la plataforma de simulación.

Los datos recolectados se presentan en el Cuadro 3.

Cuadro 3: Mediciones de la distancia de la imagen de un objeto en un espejo convexo.

Distancia de $s_o$ [cm]	Distancia de $s_i$ [cm] con $f$ de 3cm	Distancia de $s_i$ [cm] con $f$ de 5cm
2.0	-1.2	-1.4
4.0	-1.7	-2.2
6.0	-2.0	-2.7
8.0	-2.2	-3.1
10.0	-2.3	-3.3

Además, otras observaciones para ambos espejos de distancias focales de 3 y 5 cm, al colocar el objeto en todas las distancias, se notaba una imagen derecha y disminuida.

Al tomar ambos conjuntos de datos y graficarlos en las Figuras 7 y 8 para los datos de espejo cóncavo y convexo respectivamente, resulta evidente que ninguno de los dos se comporta de manera lineal.

Sin embargo, al observar la ecuación 3 que define el comportamiento de los datos teóricamente, se observa que es posible realizar un cambio de variable para linealizar los resultados observados. De esta manera:

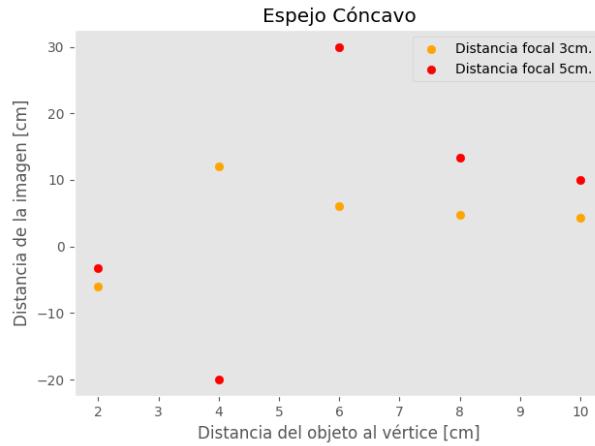


Figura 7: Distancia de la imagen contra distancia del objeto en los espejos cóncavos.

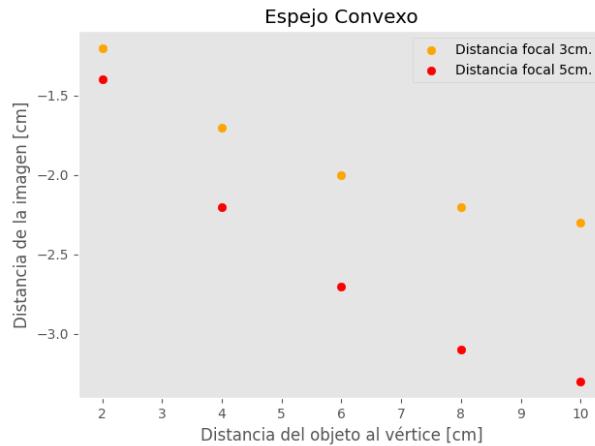


Figura 8: Distancia de la imagen contra distancia del objeto en los espejos convexos.

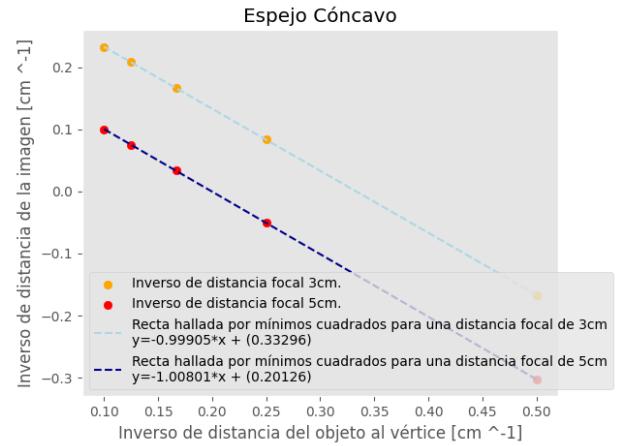


Figura 9: Distancia de la imagen contra distancia del objeto en los espejos cóncavos aplicado el cambio de variable.

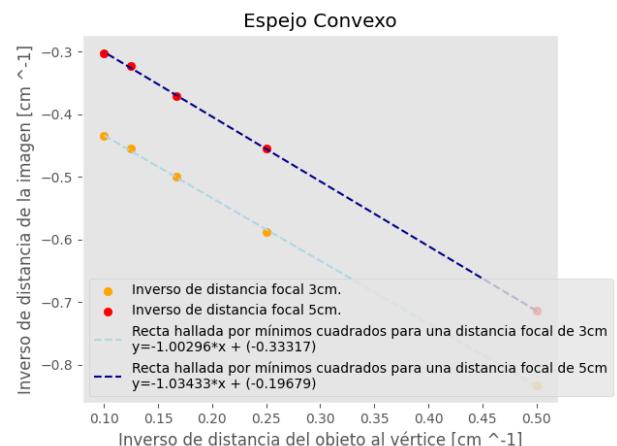


Figura 10: Distancia de la imagen contra distancia del objeto en los espejos convexos aplicado el cambio de variable.

$$\frac{1}{s'} = \frac{1}{f} - \frac{1}{s}$$

$$\begin{cases} Y = \frac{1}{s'} \\ X = \frac{1}{s} \end{cases}$$

Entonces, al aplicar dicho cambio de variable y obtener la relación lineal por medio del método de mínimos cuadrados, resultan las gráficas de las Figuras 9 y 10.

Así, se observa que se cumple la linealización, y además se logra obtener un valor experimental de la distancia focal a partir de la ecuación de la recta, ya que:

$$Y = mX + b \Leftrightarrow \frac{1}{s'} = \frac{1}{f} - \frac{1}{s}$$

$$\Rightarrow f = b^{-1}$$

Además, se puede obtener la incertidumbre de los valores de distancia focal a partir de la desviación estándar para los valores

Por lo que comparando el valor calculado contra el valor asignado en la simulación, considerando la desviación estándar de las mediciones, se obtienen los resultados del Cuadro 4.

En este caso, parece ser que el espejo convexo de distancia focal de 3cm presenta un mucho menor grado de error que los demás. Y en términos generales, los espejos de menor distancia focal parecen poseer menos error. Ello se debe a que al tener menor distancia focal,

Cuadro 4: Cálculo de las distancias focales de los distintos espejos utilizados y su porcentaje de error.

Espejo	$f$ Asignado [cm]	$f$ Calculado [cm]	Incertidumbre [cm]	% Error
Cóncavo	3	3.003	$\pm 0.145$	0.1
Cóncavo	5	4.969	$\pm 0.146$	0.62
Convexo	3	3.001	$\pm 0.145$	0.03
Convexo	5	5.081	$\pm 0.150$	1.62

Cuadro 5: Cantidad máxima de imágenes y su intervalo angular para un espejo plano.

Imágenes	Intervalo angular [°]
1	$180 \geq$
2	[171 – 179]
3	[90 – 170]
4	[88 – 89]
5	[60 – 88]
6	[56 – 59]
7	[46 – 55]
8	[40 – 45]

los espejos son más esféricos, por lo que cada pequeño cambio en la posición del objeto es más notable en la distancia de la imagen, y por lo tanto más fácil de medir y con menor error en ese respecto.

Ahora para el análisis cuantitativo de los espejos planos se utilizó la aplicación de oPhysics. Se realizaron ensayos para determinar para distintos intervalos angulares la cantidad máxima de imágenes variando la posición de la candela y el observador. En la tabla 5 se adjuntan los resultados de las mediciones obtenidas.

Al analizar los resultados se puede determinar los ámbitos de ángulos en donde se produce la cantidad máxima de imágenes como se indica en la tabla 5. El número máximo de imágenes se produce en el intervalo de  $(40^\circ - 45^\circ)$  y el número mínimo de imágenes para  $180^\circ \geq \theta$ . Se podría determinar como regla general que conforme se aumenta el ángulo entre los espejos planos, disminuye el número de imágenes.

La relación teórica entre el número máximo de imágenes y el ángulo del espejo se puede considerar como inversamente proporcional, conforme aumenta el ángulo disminuye la cantidad máxima de imágenes. Se podría predecir que el incremento de número de imágenes ocurren conforme disminuye el ángulo entre los

espejos, conforme disminuye el ángulo es más propenso a incrementar el número máximo de imágenes.

Si se disminuye el ángulo tiende a aumentar el número de imágenes pero esto depende de la posición del objeto y el observador. El número máximo de imágenes que se puede producir con un par de espejos ocurre para el intervalo angular de  $(40^\circ - 45^\circ)$ . Esto se puede mostrar utilizando la simulación, se adjunta el resultado en la figura 11.

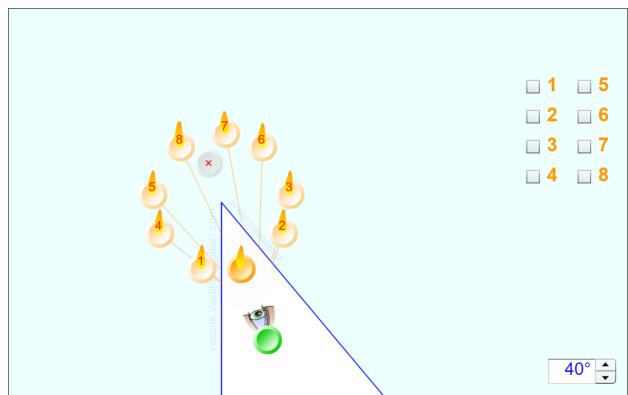


Figura 11: Prueba para la máxima cantidad de imágenes para 2 espejos planos.

## 4. CONCLUSIONES

En conclusión, se pudieron observar en los resultados de la simulación las propiedades de los distintos espejo (cóncavos y convexas) con respecto a la generación de imágenes de un objeto en relación a la posición de dicho objeto con respecto al vértice del espejo esférico. Además, se estableció una relación entre las imágenes generadas en el espejo, la distancia del objeto y el punto focal de dicho espejo.

Asimismo, se lograron aplicar las ecuaciones vistas en la teoría a los resultados experimentales obtenidos, incluso realizando un cambio de variable que permitió analizar dichos resultados de manera más adecuada con una regresión lineal.

## REFERENCIAS

- [1] Wikipedia, "Telescopio espacial hubble," 11 de agosto, 2022. [Online]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/Telescopio\\_espacial\\_Hubble](https://es.wikipedia.org/wiki/Telescopio_espacial_Hubble)

- [2] ——, “Telescopio espacial james webb,” 3 de agosto, 2022. [Online]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/Telescopio\\_espacial\\_James\\_Webb](https://es.wikipedia.org/wiki/Telescopio_espacial_James_Webb)
- [3] Solar Reserve, “Solarreserve - the future is here,” 22 de febrero, 2016. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=d0uJxHWaq0k>
- [4] Wikipedia, “Experimento de fizeau,” 25 noviembre, 2021. [Online]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/Experimento\\_de\\_Fizeau](https://es.wikipedia.org/wiki/Experimento_de_Fizeau)
- [5] Vidrio Panel, “¿cómo se hace un espejo de vidrio?” 2019. [Online]. Available: <https://www.vidriopanel.es/blog/como-se-hace-un-espejo-de-vidrio/>
- [6] Sears F., Zemansky M., Young H., and Freedman A., *Física universitaria Volumen 2*, 13th ed. México, D.F.: Pearson Educación, 2003.
- [7] E. Hecht, *Óptica*, 5th ed. México, D.F.: Pearson Educación, 2017.