¿Cómo sabe la luz cual es el camino más corto?

Daniel Hernández García y Gabriel Tapia González

I.E.S Cardenal Cisneros

1º B – Bachillerato

Física y Química

Mayo 2026

Abstract

In our project we aim to understand and try to prove that we can create a camouflage of a little object by using different types of liquids to refract light. Our goal is to hide it to a certain level by applying different concepts of how light behaves in each environment.

To achieve the objective of it, we have created a container of methacrylate walls with set angles and distances to change the path of a laser pointer and therefore eliminate the complete image of the previously mentioned little object.

After careful analysis we have reached the conclusion that our hypothesis is in fact true because we have successfully bent light according to our predictions and consequently concluded that the experiment, with its flaws, was a success.

Resumen

En nuestro proyecto buscamos entender y demostrar el hecho de que somos capaces de crear un camuflaje para un objeto pequeño mediante el uso de distintos tipos de líquidos. Nuestro objetivo es esconderlo hasta cierto punto aplicando distintos conceptos sobre cómo se comporta la luz en cada medio.

Para conseguir el objetivo, hemos creado un contendedor con paredes de metacrilato con ángulos y distancias ya definidas para cambiar la dirección del puntero laser y por tanto eliminar la imagen completa del objeto previamente mencionado.

Después de un análisis cuidadoso hemos llegado a la conclusión de que nuestra hipótesis en cierta y que por lo tanto hemos curvado la luz acorde a nuestras predicciones y que el experimento, con sus defectos, ha sido un éxito.

Abstract 1
Resumen 1
Introducción teórica 3
La luz 3
La refracción e índices de refracción 4
Principio de Fermat 4
Ley de Snell 5
Lentes 6
Ojo humano 8
Hipótesis 9
Experimentación 9
Materiales 9
Proceso de experimentación 10
Discusión de resultados 15
Conclusión 16
Agradecimientos 17
Bibliografía 17

Introducción teórica

De pequeños a todos se nos cayó algo en un vaso de agua y a la mínima que nos fijásemos pudimos ver como la imagen de dicho objeto estaba distorsionada y no era igual que cuando la sosteníamos en el aire, o que cuando buceábamos y mirábamos a la superficie veíamos una zona donde se veía el exterior del agua y alrededor de esta zona el reflejo del suelo de la piscina. ¿Pero eso, por qué pasa? Nuestro niño interior se lo ha preguntado y venimos a resolverle la duda.

La luz

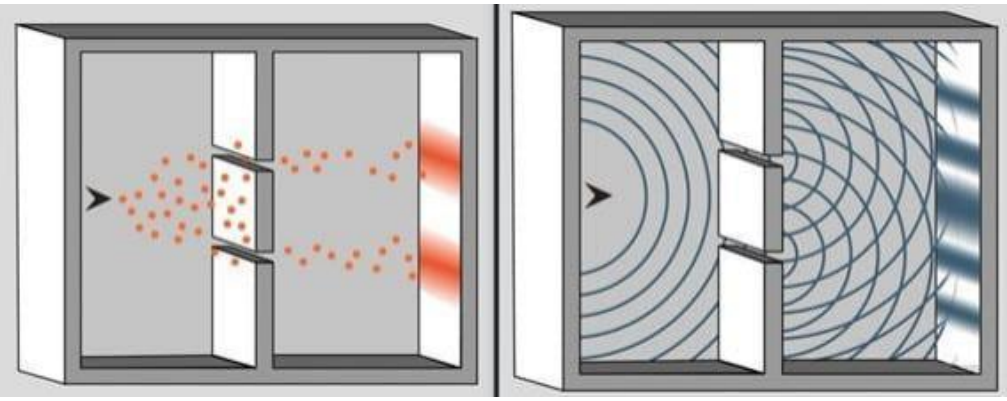
El primer concepto que debemos conocer es la luz, y de esta debemos entender qué es y cuáles son sus propiedades. Las situaciones previamente mencionadas solo suceden debido a como interacciona la luz. Por ello debemos explicar su naturaleza.

La luz presenta una dualidad, lo que quiere decir que se puede comportar como una partícula cuando interactúa con la materia o como una onda al viajar. Debido al tema que se trata en este proyecto nos interesa este último comportamiento.

Una onda es un desplazamiento de energía en el que no hay desplazamiento de materia. En el caso del sonido, que también es una onda, es el aire el canal el cual lleva la energía, y por esto se le llama onda mecánica. Por otra parte, se dice que la luz es una onda electromagnética, lo que quiere decir que el canal por el que se transmite la energía es un campo magnético. Este oscila perpendicularmente a un campo eléctrico.

Sabemos que la luz tiene esta propiedad gracias al experimento de la doble rendija, el cual consiste en hacer pasar luz a través de dos rendijas de un tamaño de entre 0.1 μm y 100 μm, con una separación entre ellas de 10 μm a 1 mm.

Al hacer pasar la luz por estas rendijas, encontramos un patrón de interferencia (zonas de luz y oscuridad intercaladas), el cual se forma porque al comportarse como una onda, se crea otra fuente de luz y al interactuar las dos fuentes de luz, se amplifican cuando interfieren dos máximos o se anulan cuando interfieren un máximo y un mínimo.



1 representación del experimento de la doble rendija

La refracción e índices de refracción

La refracción es el fenómeno donde la trayectoria de luz cambia de dirección al cambiar de medio. Para calcular la velocidad en cada medio hay un coeficiente que varía en cada medio con el cual se divide la velocidad de la luz en el vacío. A cada coeficiente se les llama índice de refracción y se representa con la letra n.

Esta reducción en la velocidad se debe a que cuando la luz se topa con los átomos en su camino, su campo magnético hace vibrar a los electrones, y estos al vibrar emiten otra onda electromagnética, que debido al tiempo que tardan los electrones en vibrar y devolver la onda crean un desfase que, al sumarse a la onda principal, hacen que la onda resultante tenga un pequeño desfase. Como atraviesa casi infinitas capas de electrones, no hace que lo percibamos como una interferencia o un retraso en la luz sino como una ralentización. No existe un máximo de ralentización teórico, pero el material conocido con mayor índice de refracción de luz visible es el diamante. Su índice es de aproximadamente 2,4.

Este pequeño desfase se puede explicar mediante el uso del principio de Fermat para entenderlo físicamente o la ley de Snell para entenderlo de forma matemática.

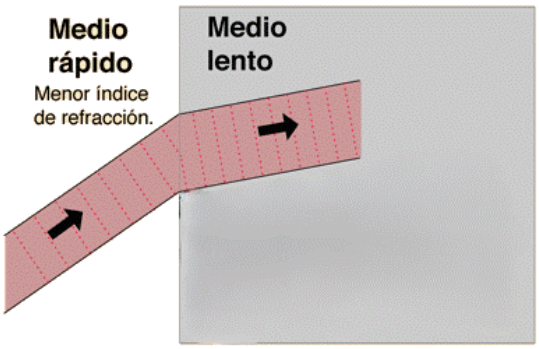
Principio de Fermat

El principio de Fermat nos permite entender cómo se refracta la luz, Fermat se dio cuenta de que la luz sigue el camino más rápido a recorrer en cuanto a tiempo. Cuando viaja la luz por un mismo medio, sea el que sea, la trayectoria óptima en cuanto a distancia es una línea recta. Sin embargo, si el medio cambia, la trayectoria óptima deja de ser una línea recta. La trayectoria más rápida será la que combine mejor el recorrido en cada medio teniendo en cuenta que dependiendo del medio la velocidad varía. Por lo tanto, no será una única línea recta si no, dos o más dependiendo del número de medios.

Supongamos que tenemos un puntero de luz con el que queremos trazar un rayo que atraviesa un punto A y un punto B. Si tenemos el punto A en el aire y el punto B en agua tendremos que trazar la trayectoria más eficiente posible, que en este caso consistirá en mantenerse en el aire más tiempo de lo normal para viajar por el agua menos tiempo. No será el camino que más tiempo pase en el agua y el mayor por el aire ya que se alargaría mucho el recorrido.

Esta desviación el haz de luz se debe a que el frente de onda cambia su velocidad. El frente de onda es el conjunto de puntos en los que la fase de la onda es igual. Los rayos de luz son perpendiculares al frente de onda, por lo que si cambia el frente de onda cambia la trayectoria de la luz.

Si el haz de luz incide perpendicularmente no importará, porque todas las partes del frente de onda se ralentizarán a la vez. En cambio, si el haz incide con cualquier otro ángulo, unas partes del frente de onda se ralentizarán antes que otras y al descuadrarse el frente de onda, cambiará la trayectoria de la luz.



2 representación de la desviación del frente de onda

Al pasar de un medio rápido a uno lento, la trayectoria de la luz se pegará al eje de la perpendicular de la superficie en la que incida porque las partes más cerca de la perpendicular se empezaran a ralentizar antes. Por el contrario, si pasa a un medio rápido de un medio lento se separará de este eje ya que se ralentizarán las partes más lejanas a la perpendicular antes.

Ley de Snell

Es la ley que permite predecir el ángulo que tendrá la luz al cambiar de medio.

Ecuación 1: $n_1 \times sen\theta_1 = n_2 \times sen\theta_2$

Pongamos que estamos apuntando con un láser con un ángulo de 45 grados respecto de la perpendicular a la superficie de una piscina de aceite de oliva y queremos saber que ángulo formara la luz una vez entre en el aceite. Podemos predecirlo usando la fórmula. El índice de refracción del aceite de oliva es de entre 1,467 –1,47 por lo que tomaremos el punto medio como referencia. Por lo tanto,

Ecuación 2:

Al despejar la ecuación nos sale que el ángulo que se forma es de 28º 52' 44,27" respecto a la perpendicular mencionada.

Además, hay una tendencia en la que cuando la luz cambia de un medio rápido a uno lento el ángulo tiene a cerrarse, sin embargo, cuando el cambio se produce al revés hay un fenómeno donde si el ángulo refractado cruza los 90º deja de refractarse y se refleja.

Este fenómeno se utiliza en los cables de fibra óptica donde la luz viaja por el núcleo del cable, es decir, la parte interna. Mientras refleja en el revestimiento porque el ángulo incidente es mayor al ángulo crítico donde empieza a reflejar, es decir que ya no refracta. Esto solo funciona porque el índice de refracción del núcleo es mayor que el del revestimiento del cable haciendo que la luz no se pueda escapar.

El ángulo concreto con el que tenemos que apuntar lo podemos calcular con la Ley de Snell porque sabemos ambos índices de refracción y el ángulo que tiene que formar en el medio rápido que es 90º.

Volvamos al ejemplo del aceite y el aire. ¿En qué ángulo dejara de refractar el aceite para solo reflejar? Aplicamos la Ley de Snell con lo previamente explicado.

Ecuación 3:

Al despejar la ecuación sabremos que el ángulo con el que la luz deja del aceite y rebota es de 42º 26' 2,08".

Para poder entender el experimento que queremos hacer es necesario también continuar con cómo funciona la refracción en lentes y sus aplicaciones.

Lentes

Las lentes como las gafas o las lupas se basan en el principio refracción. Hay tres tipos de lentes, y se clasifican dependiendo de su forma y la forma en la que se refracta la luz al atravesarlas. Pueden ser paralelas, convergentes o divergentes.

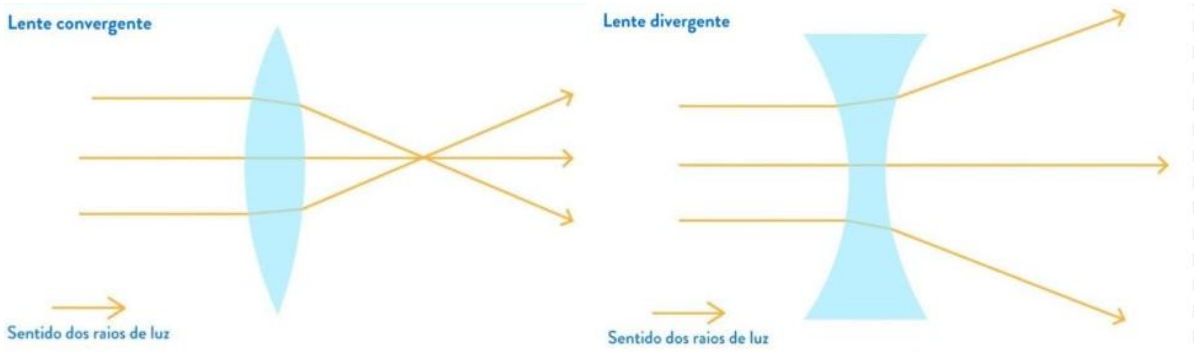
Las lentes paralelas no cambian la trayectoria de la luz ya que al entrar la luz en un medio más lento se curva la luz de una forma contraria a la que se curvara al salir de nuevo a un medio más rápido del que ya venía y se anulara el efecto de la refracción.

Las lentes convergentes:

- Las lentes convergentes tienen una forma convexa es decir más gruesa en el centro y más fina en los bordes. Un lado de los dos tiene que mantener esta forma siempre mientras que el otro puede ser de esta misma forma o recto, aunque si es recto el efecto convergente será de menor intensidad.
- Convergen la luz en un punto focal, es decir, juntan los haces de luz. Esta convergencia se puede aprovechar en las gafas de gente con hipermetropía o lupas.
- La convergencia sucede porque la perpendicular a la superficie de la lente tiene distinta inclinación en cada punto. Al refractarse, la luz convergerá en un punto focal real situado detrás de la lente.

Las lentes divergentes:

- Las lentes divergentes tienen una forma cóncava es decir más fina en el centro y más gruesa en los bordes. Un lado de los dos tiene que mantener esta forma siempre mientras que el otro puede ser de esta misma forma o recto, aunque si es recto el efecto divergente será de menor intensidad.
- Divergen la luz, es decir, separan los haces de luz. Esta convergencia se puede aprovechar en las gafas de gente con miopía.
- La divergencia sucede porque la perpendicular a la superficie de la lente tiene distinta inclinación en cada punto. Al refractarse, la luz convergerá en un punto focal virtual situado antes de la lente. Esto significa que ese punto focal es imaginario, por lo que divergirá la luz detrás de la lente.



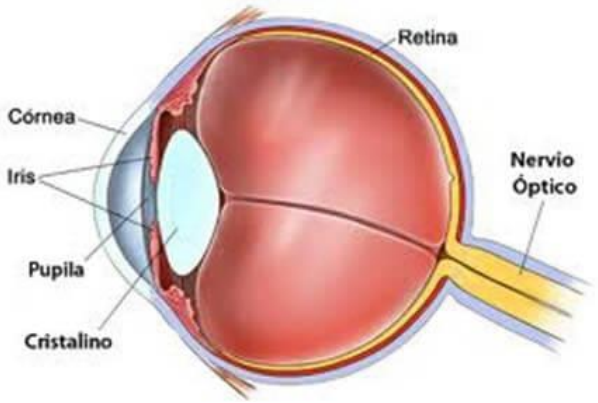
3 representación de lentes convergentes y divergentes

Estos conocimientos sobre cómo funcionan las lentes son muy prácticos cuando sufrimos de alguna enfermedad o impedimento visual. Para entender el porqué de que usemos gafas tenemos que entender primero nuestro ojo.

Ojo humano

El ojo humano tiene distintos elementos que trabajan para percibir imágenes que luego enviaremos al cerebro, los elementos que nos interesan porque tienen relación con la refracción de la luz son el cristalino y la retina.

El cristalino es una lente convergente flexible, es decir que puede cambiar su forma y por lo tanto su potencia para converger los rayos de luz, que se tendrán que proyectar sobre la retina que creara la imagen para mandar al cerebro. Cuando la convergencia del cristalino no converge exactamente en la retina es cuando tenemos casos de problemas de vista, como la hipermetropía o la miopía. Esto puede ocurrir porque el cristalino del ojo enfermo sea demasiado potente o débil. Esta variación de potencia genera que la luz converja antes o después de lo debido. Y por lo tanto hipermetropía o miopía.

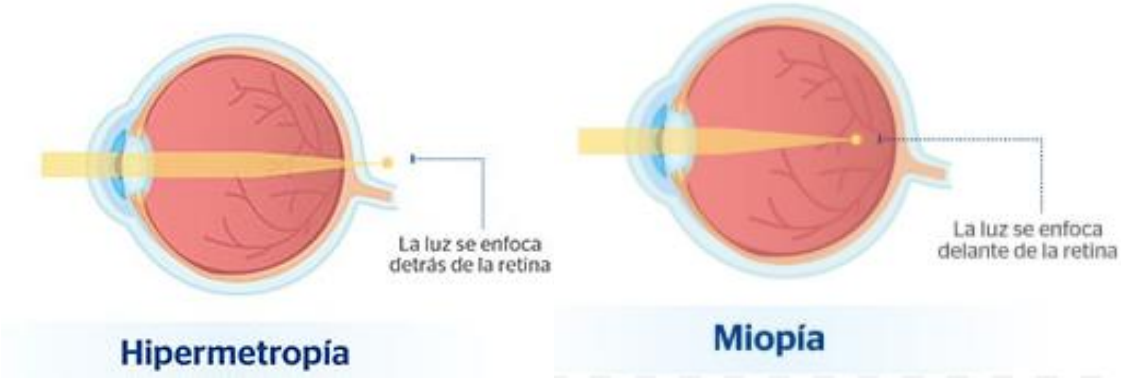


4 representación del ojo humano

La hipermetropía: Es un problema causado porque ya sea la forma del cristalino o el tamaño del ojo que no sea acorde a un cristalino sano, hagan que los haces de luz no converjan exactamente en la retina, si no en un punto focal posterior a esta. Esto hace que la retina no pueda dar una imagen definida. La forma de contrarrestar esto es con una lente convergente previa a los ojos, como unas gafas, que haga que el punto focal se ajuste a la retina.

La miopía: Es un problema causado porque ya sea la forma del cristalino (que es demasiado potente) o el tamaño del ojo que no sea acorde a un cristalino sano, hagan que los haces de luz no converjan exactamente en la retina, si no en un punto focal previo a esta. Esto hace que la retina no pueda dar una imagen definida. La forma de

contrarrestar esto es con una lente divergente que haga que el punto focal se ajuste a la retina.



5 representación de ojos humanos con miopía e hipermetropía

Hipótesis

Nuestra hipótesis es que con todo este conocimiento de lentes y índices de refracción vamos a ser capaces de ocultar parcialmente un objeto pequeño que este delante de nosotros curvando la luz con distintos líquidos. Creemos que, desde ciertos ángulos, el objeto se va a ver adelgazado, no desde todos, y que después, nuestro recipiente reconducirá los rayos para deformar el fondo, desde una perspectiva frontal, lo menos posible.

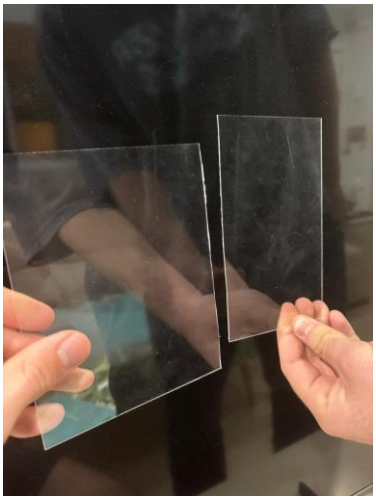
Experimentación

Materiales

Para nuestro experimento necesitaremos:

- Líquidos para curvar la luz: Glicerina vegetal.
- Un recipiente para contener los líquidos hecho con láminas de metacrilato para hacer divisiones en el recipiente.
- Silicona caliente, cúter y regla para pegar y cortar las láminas con medidas precisas.
- Un láser para ver la trayectoria que recorre la luz.
- Un objeto pequeño con color llamativa como una ficha de un juego de mesa.

6 bote de glicerina vegetal



7 láminas de metacrilato

8 pistola de silicona y silicona

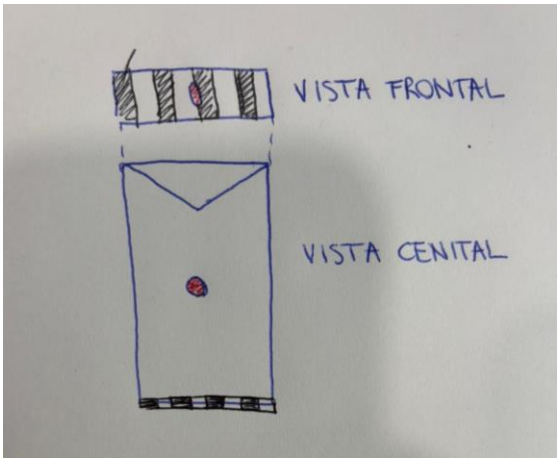
9 regla medidora y cúter

10 puntero láser

11 ficha de juego de mesa

Proceso de experimentación

En primer lugar, creamos un croquis para tener claro como queríamos empezar. En este se pensó como tenía que ser la inclinación de la primera lamina, simulando una especie de lente convergente. En la vista frontal se observa como queríamos que se viese la ficha achatada en el eje x y el fondo rayado lo mejor reconstruido posible.

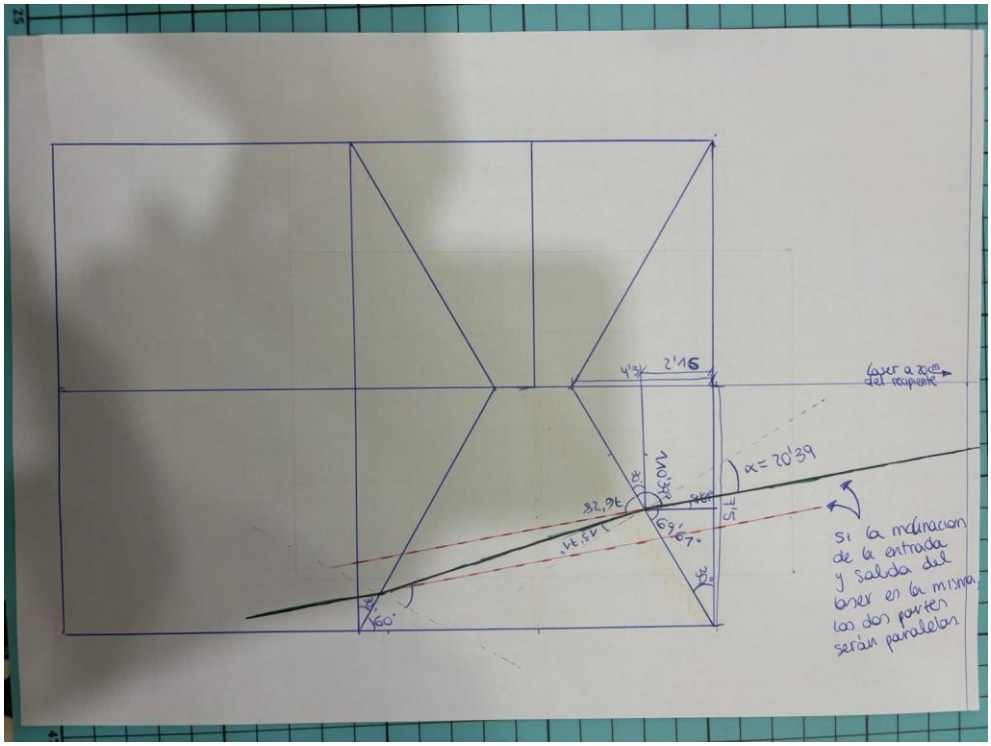


12 croquis del recipiente

Tras esto nos pusimos a hacer los cálculos de cómo se debería de comportar la luz para conseguir que nuestro objetivo para el cual diseñamos un plano escala 1:1. Lo primero que hicimos fue establecer a que distancia de nuestro recipiente se situaría el láser, por lo que establecimos una distancia que nos pareció bien, 20cm.

Además, también establecimos el ángulo que iban a tener las paredes, y sabíamos que la luz no podría entrar con más de 42º 26' 2,08" respecto con la horizontal, ya que si no el haz de luz rebotaría. Este cálculo ya lo habíamos hecho previamente en la Ley de Snell con aceite, pero el aceite y la glicerina tienen el mismo índice de refracción. Probamos entonces con un ángulo de 30º con respecto al recipiente y gracias a algunos cálculos básicos de trigonometría, vimos que el láser entraría con un ángulo de 20, 39º.

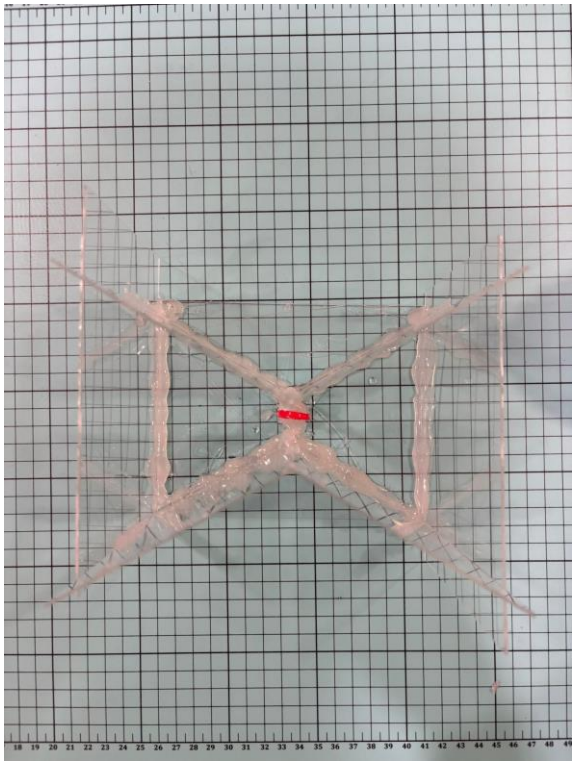
Por último, calculamos que el láser saldría con 13, 71º utilizando la Ley de Snell. Para corregir la desviación de los rayos de luz cometimos un error, pensamos que para que los rayos de la entrada y de la salida fueran paralelos tendríamos que crear la misma geometría en un lado que en otro, pero a la inversa. Esto no es así, en realidad, necesitábamos hacer exactamente la misma geometría en la entrada de la luz y en la salida, para tener como resultado una lente paralela y que así los rayos de luz salieran y entrasen paralelos.



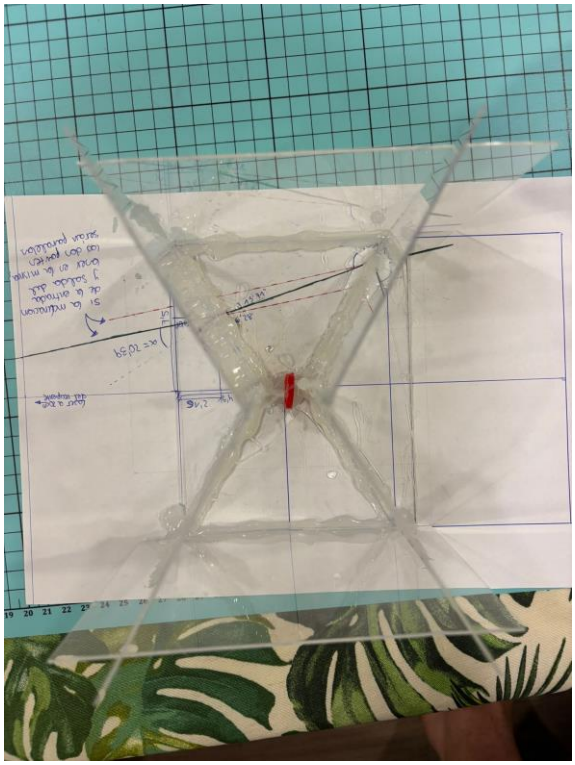
13 planos del recipiente

Una vez realizados los cálculos nos fue necesario crear láminas que nos sirviesen para que las medidas coincidiesen con los cálculos hechos. Es por esto por lo que cortamos cuatro láminas de 8,6 cm de ancho que fueron las que colocamos en un ángulo específico para curvar la luz. A su vez creamos otras dos láminas de 12 cm para crear una pared más baja y que por lo tanto la parte manual de la creación del recipiente fuese más accesible.

Finalizada la parte de ajuste de piezas nos dedicamos a dibujar marcas en cada punto clave en nuestra lámina base. Colocamos las láminas de 8,6 cm y procedimos a sellarlas usando la pistola de silicona. Terminada la caja hicimos una comprobación del sellado vertiendo agua y comprobamos que no escapaba por ninguna arista. Después para mantener la ficha en medio y facilitar la colocación le pusimos silicona en la base y la colocamos en el centro del recipiente.

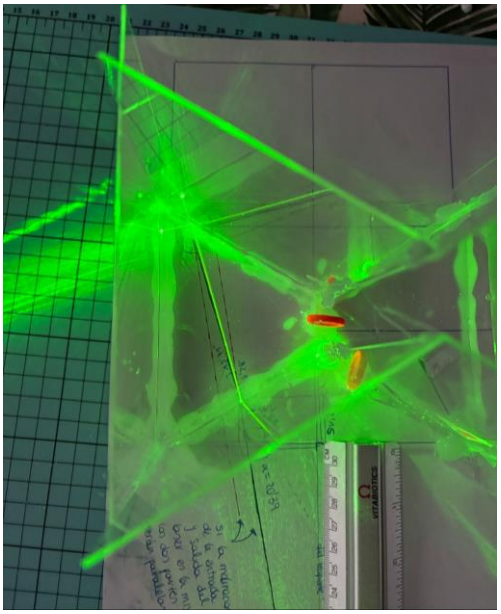


14 recipiente terminado

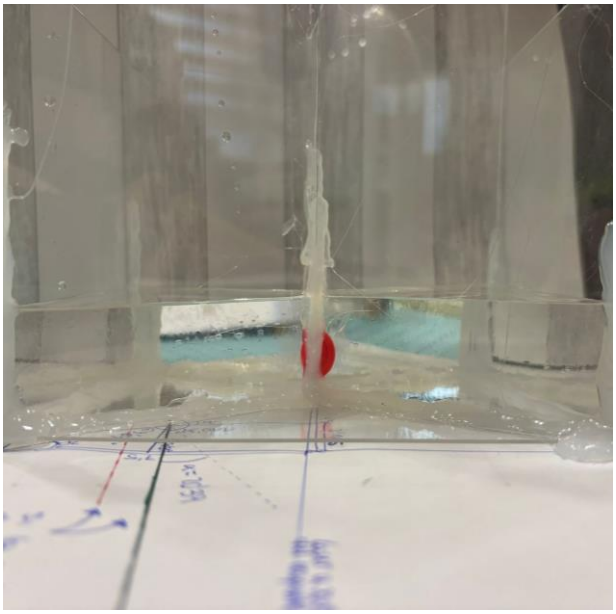


15 recipiente comparado con los planos

Tras tener el recipiente listo, comenzamos con la experimentación propiamente dicha. Vertimos la glicerina, apagamos las luces y apuntamos con el láser para comprobar si la luz seguía el camino trazado, también hicimos la prueba de mirar a través del recipiente para ver si los rayos eran capaces de reconstruir la imagen del fondo:

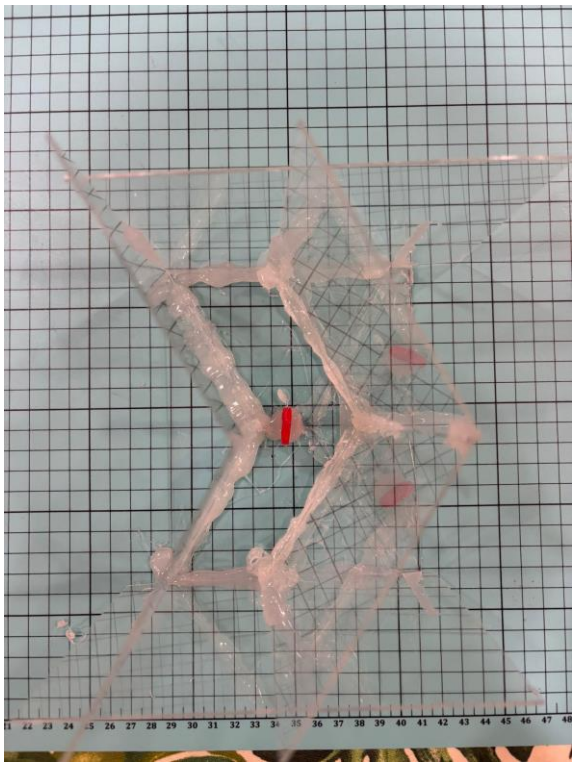


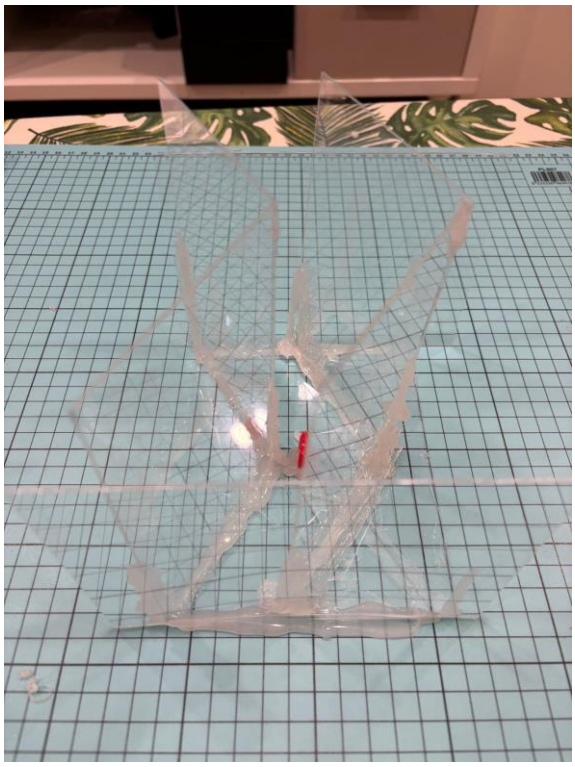
16 rayo láser atravesando el recipiente



17 reconstrucción del fondo

Tras esta prueba nos dimos cuenta de dos cosas: el láser seguía perfectamente nuestro plano tras atravesar la primera pared del recipiente, y que, sin embargo, en la segunda pared, rebotaba. En consecuencia, el fondo no se reconstruía. Entonces nos dimos cuenta de que habíamos planteado mal los planos desde el inicio y decidimos recolocar la segunda pared del recipiente dada la vuelta como se observa en la imagen:



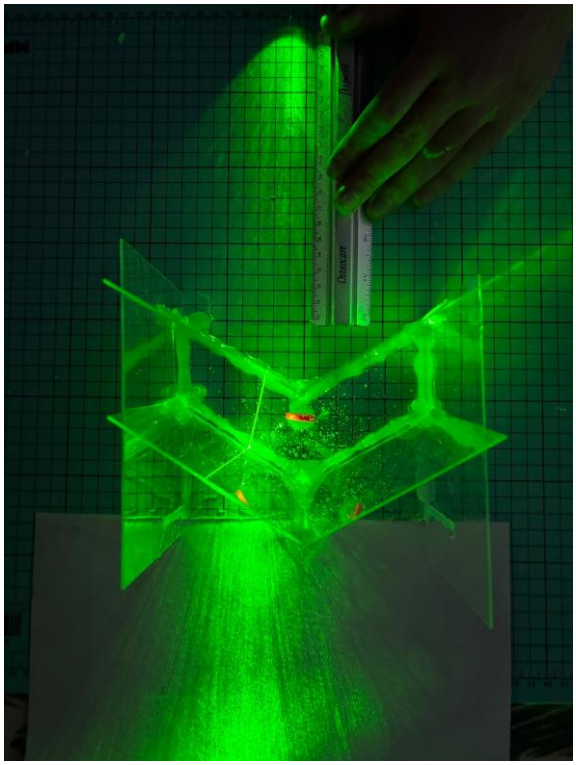


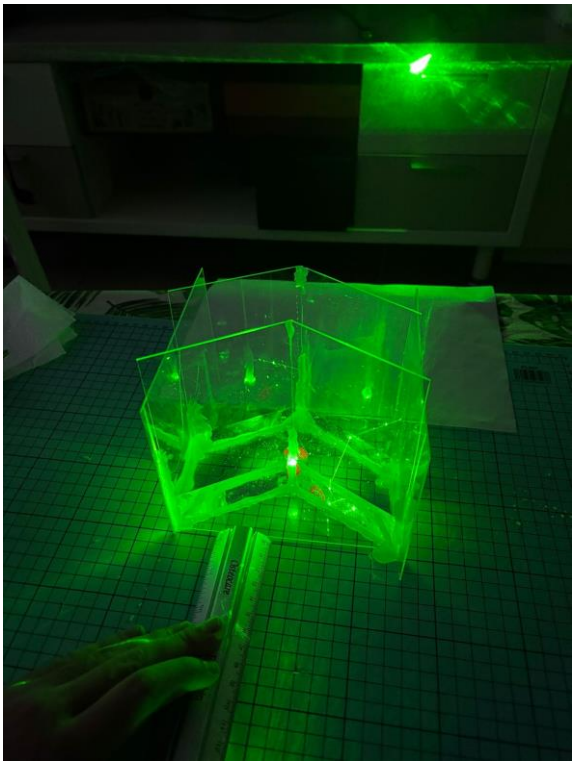
18 y 19 recipiente tras ser recolocado

Con esto, volvimos a intentar la experimentación siguiendo con exactitud los mismos pasos anteriormente mencionados y conseguimos unos buenos resultados.

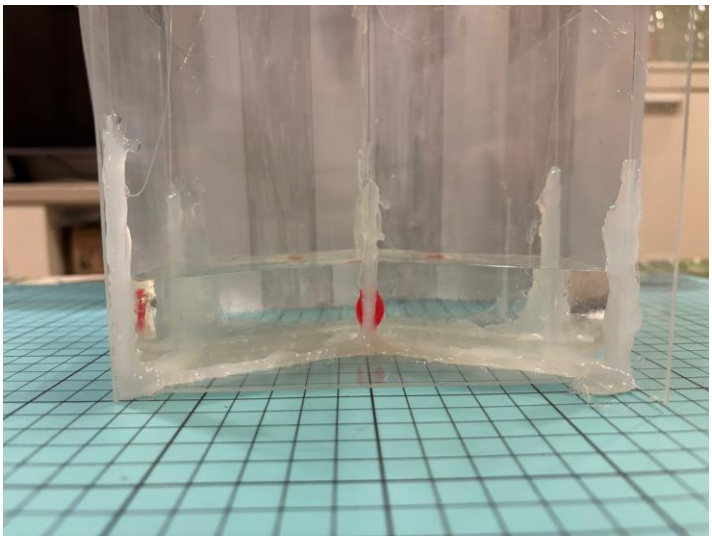
El láser seguía manteniendo una buena dirección tras pasar la primera pared como era de esperar y además se reconducía exitosamente.

Además, cuando mirábamos desde la vista frontal se podían ver perfectamente las líneas, aunque un tanto movidas, debido al efecto que tienen las lentes paralelas.





20 y 21 prueba definitiva con el láser



22 prueba de reconstrucción del fondo definitiva

Discusión de resultados

Finalizado el experimento llegamos a las siguientes conclusiones.

Gracias a la información recogida por la introducción teórica hemos sido capaces de curvar la luz como deseábamos.

Gracias a la información sobre la luz y el principio de Fermat hemos conseguido una base de información crucial para el proyecto. Además, gracias a la ley de Snell y las lentes y el ojo humano hemos sido capaces de predecir matemáticamente la trayectoria del haz de luz y hemos sido capaces de identificar cual era nuestro problema con el primer intento, en el que gracias a saber que son las lentes comprendimos que acabábamos de crear una lente divergente mientras que lo que necesitábamos era una lente paralela.

De lo previamente mencionado podemos derivar que sí, nuestra hipótesis inicial se ha cumplido. Hemos conseguido manipular de manera controlada la luz para llegar al efecto deseado.

Dentro del proyecto también hay que mencionar que la cantidad de errores experimentales que pueden haber sucedido no son pocos. Primero de todo en los cálculos ha habido diversos redondeos de unidades. A su vez la creación del recipiente al estar hecho a mano las medidas distan de ser exactas y la posición del láser puede haber variado ligeramente entre fotos ya que no estaba sujeto de forma segura.

Durante la prueba de sellado puede haber quedado alguna traza de agua que haya variado el índice de refracción en el punto medido. Además, no podemos saber con certeza que el índice de refracción de nuestra glicerina era exactamente el establecido sino una aproximación.

En nuestra opinión la mayoría de las imprecisiones son directamente relacionadas con la imposibilidad de mayor precisión sin herramientas más sofisticadas. Sin embargo, podríamos haber esperado a que el agua se secase en su totalidad esperando a que se evaporasen las últimas partículas que existiesen si es que las hubiese.

Conclusión

Finalizado de forma definitiva podemos concluir que el experimento ha sido un éxito ya que hemos sido capaces de probar nuestra hipótesis mediante la información recabada en la introducción teórica y darle la forma adecuada para nuestros intereses.

Es cierto que nuestra experimentación ha tenido que variar para hacer el trabajo algo más interesante y no simplemente probar la teoría. Además, es emocionante especular las aplicaciones prácticas que podría llegar a tener esta idea ya que quedaría mucho por

comprobar. Mezclando otros tipos de líquidos y con distintas formas de montajes hay muchas más posibilidades y si añadiésemos lentes aún más.

Es por esto por lo que podríamos intentar aplicarlo en la óptica propiamente dicha. El estudio del mar afectando a las observaciones que se hagan. En arquitectura para crear el salón con la iluminación perfecta a través de una pecera como ventana o en diseño de una realidad virtual que refleje este fenómeno tan curioso entre otras ideas.

Para concluir hay que recalcar que la idea teórica del proyecto es válida y correcta pero la fiabilidad del experimento en sí es baja debido a la gran cantidad de inexactitud experimentales que hemos comentado y otras que no hayamos tenido en cuenta.

Agradecimientos

Queremos terminar agradeciendo a nuestras familias por financiar ciertas partes del proyecto y su apoyo inconmensurable durante todo el proceso. También queremos agradecer a nuestro profesor de Física y Química Álvaro Peralvo Simón por sus correcciones tan detalladas y su proactividad a la hora de intentar ayudarnos durante el proceso. A nuestro amigo Jorge por el láser y finalmente al IES Cardenal Cisneros por ofrecernos sus instalaciones para el trabajo.

Bibliografía

Argáez-Mendoza, S., & Oliva, A. I. (2011). El principio de Fermat, la braquistócrona y¿ la curvatura de la luz?. *Ingeniería*, *15*(1), 47-55.

Vega, T. L. ÓPTICA FÍSICA Y ÓPTICA GEOMÉTRICA Física 2º Bachillerato.

Video utilizado para una mejor comprensión de la parte conceptual: https://www.youtube.com/watch?v=3D-YZ6DCb8o&t=564s

Apoyo utilizado para comprobar si los conceptos durante la experimentación durante el proceso eran correctos: https://chatgpt.com/