

Técnicas Experimentales I

Laboratorio Básico

Práctica 5:

Óptica

Pedro Martínez Caamaño

1• Objetivos

El principio más básico y fundamental de la óptica que explica la naturaleza de la refracción de un haz de luz en el cambio de un medio a otro es la conocida Ley de Snell, que relaciona las cualidades de un medio, índice de refracción, con la desviación de una recta de luz al cambiar entre estos medios.

$$n_1 \cdot \text{sen}(\theta_1) = n_2 \cdot \text{sen}(\theta_2)$$

Dónde n_i representa el índice de refracción, que es la relación de la velocidad de la luz en este medio con la del vacío.

$$n = \frac{c}{v}$$

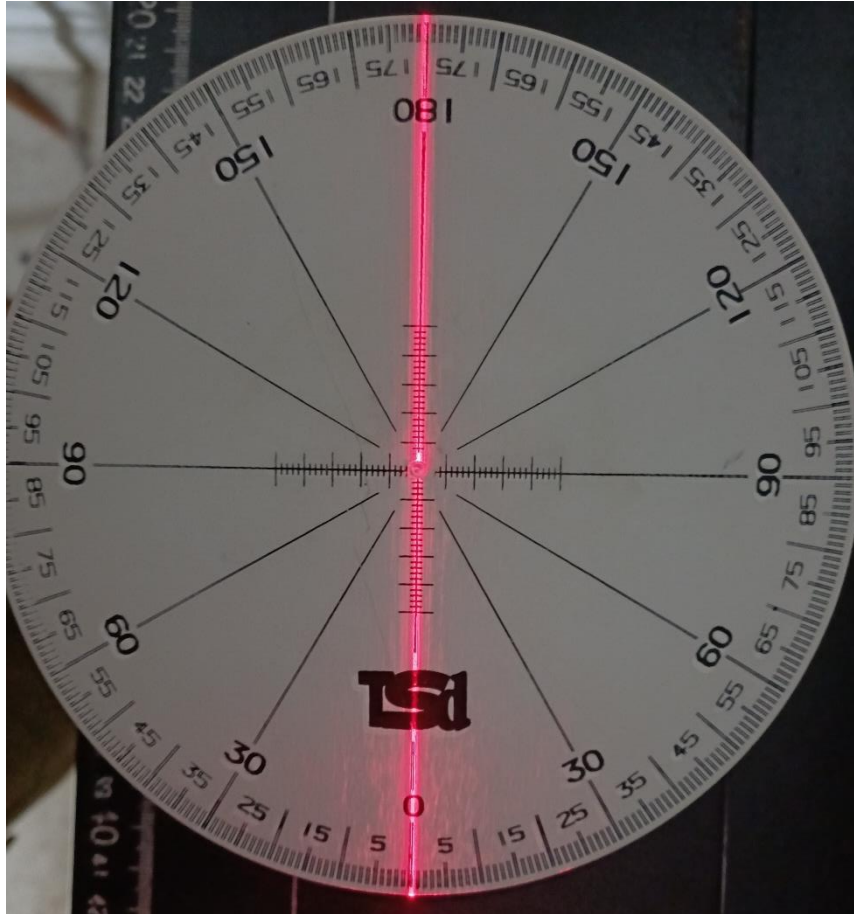
En esta práctica evaluaremos el índice de refracción de distintos medios distintos, vidrio, agua y alcohol, siendo esa la primera parte. En la segunda, verificaremos los principios de la óptica geométrica con dos lentes distintas, divergente y convergente.

2• Material

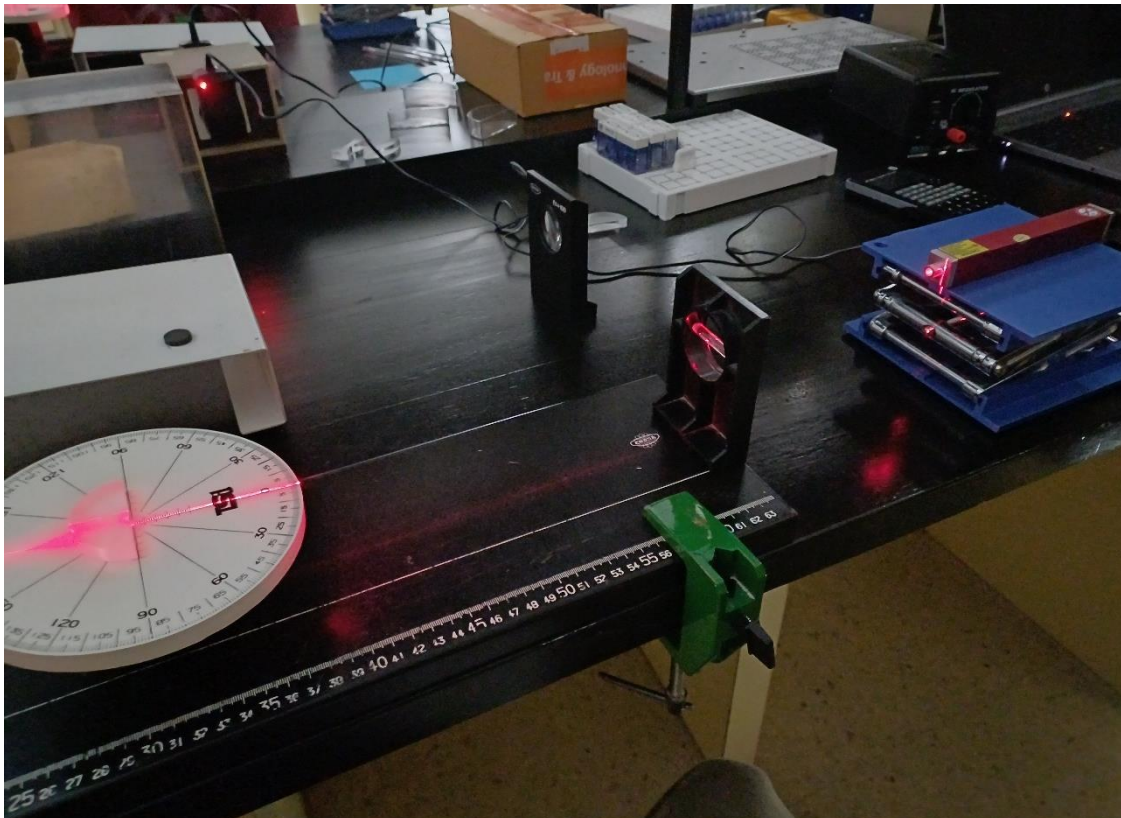
Los materiales necesarios para este experimento, para ambas partes, serán los siguientes:

- Puntero Láser con soporte. Fuente de luz, así como el entorno donde sostenerlo.
- Banco Óptico. Soporte estático imantado donde situaremos el resto de materiales.
- Lente Cilíndrica. Lente cilíndrica de vidrio en posición horizontal que se sitúa tras el haz del láser para colimar sus rayos, esto es convertirlos en un haz de rayos paralelos entre sí y a la superficie del banco óptico.
- Disco de Hartl con soporte. Disco graduado angularmente con un soporte cilíndrico imantado que se colocará sobre el banco óptico.
- Lente de vidrio semicircular. Material 1 para evaluar.
- Cubeta Semicircular. Donde se situarán los líquidos que serán material 2 y 3 a evaluar.
- Agua y Alcohol de 96°.
- Lentes Convergente y Divergente.
- Papel.
- Imanes.

Su colocación básica inicial será la siguiente, con previo alineamiento del disco de Hartl con el rayo de luz del láser:



Alineamiento del disco de Hartl con el láser.



3- Procedimiento

Dividiremos el procedimiento en dos partes; para estar a su vez dividida en subpartes.

Parte 1

El objetivo de esta sección es encontrar el índice de refracción en tres medios distintos para posteriormente compararlo con valores aceptados por la comunidad científica; estos medios serán el Vidrio, Agua y Alcohol. Para estos tres, los métodos explicados a continuación serán idénticos, así como la forma en la que trataremos sus datos.

Parte 1.1 Incidencia sobre el medio:

El rayo incidente, en esta sección, provendrá del medio aire e incidirá sobre el medio a evaluar. Esto es debido a la colocación de la cara plana del semicilindro hacia el rayo láser. Como el índice de refracción del aire se puede aproximar a 1, quedaría que:

$$n_{aire} \cong 1 \rightarrow \text{sen}(\alpha_i) = n_x \cdot \text{sen}(\alpha_r)$$

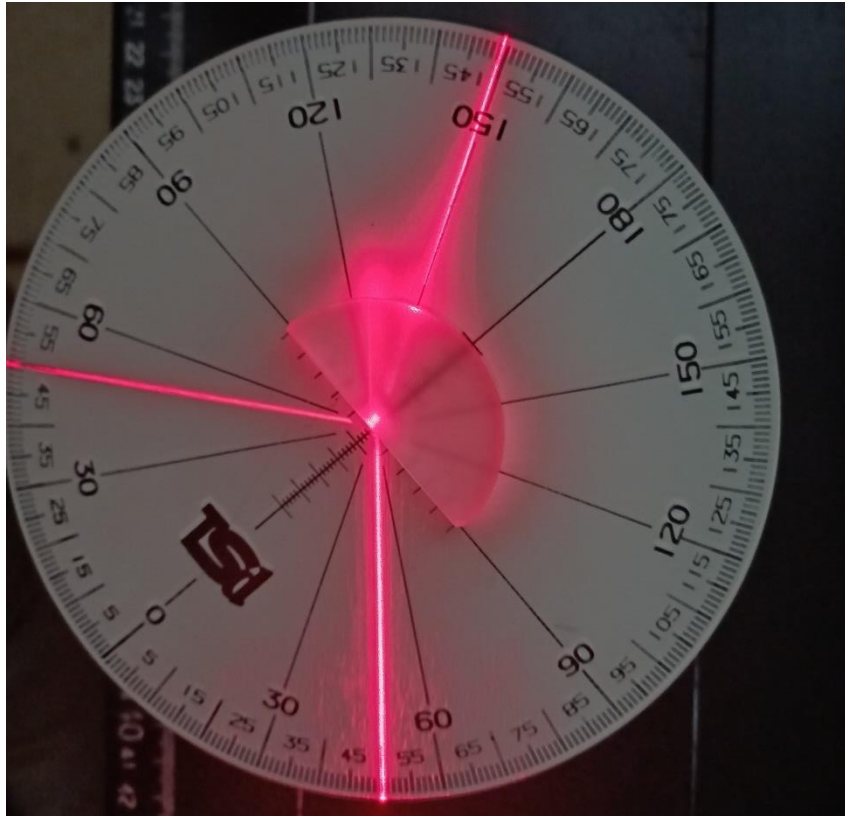
Donde i representa la incidencia, r la refracción y x el medio a evaluar.

Operando obtenemos:

$$n_x = \frac{\text{sen}(\alpha_i)}{\text{sen}(\alpha_r)}$$

Ecuación 1

Con ello, si representamos el seno de rayo incidente frente al seno de rayo refractado, nos debería dar una recta que pasa por el origen con pendiente de valor índice de refracción.



Ejemplo de colocación de lente en aire-medio.

También operando obtendríamos como incertidumbre:

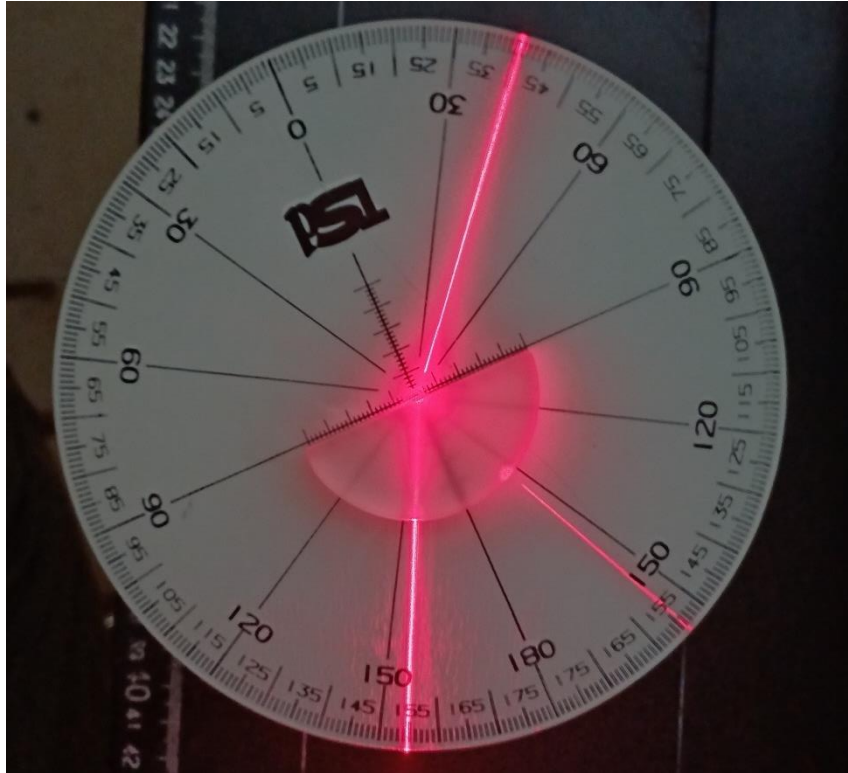
$$s(n_x) = \sqrt{\left(\frac{\cos(\alpha_i)}{\cos(\alpha_r)}\right)^2 \cdot s^2(\alpha_i) + \left(\frac{\text{sen}(\alpha_i) \cdot \cos(\alpha_r)}{\text{sen}(\alpha_r)^2}\right)^2 \cdot s^2(\alpha_r)}$$

Ecuación 2

Pero el error que nos da si hacemos la media cuadrada de esta incertidumbre con la dada por el ajuste de mínimos cuadrados es demasiado alta (el orden de 0,1), así que no la tomaremos en cuenta.

Parte 1.2 Incidencia desde el medio:

Se diferencia del subapartado anterior en que el rayo incidente procede ahora del medio a evaluar, ya que habremos situado el semicírculo con la cara curva situada por el rayo entrante.



Ejemplo de colocación de lente en medio-aire.

La ecuación correspondiente quedaría ahora:

$$n_{\text{aire}} \cong 1 \rightarrow \text{sen}(\alpha_r) = n_x \cdot \text{sen}(\alpha_i)$$

Por lo que:

$$n_x = \frac{\text{sen}(\alpha_r)}{\text{sen}(\alpha_i)}$$

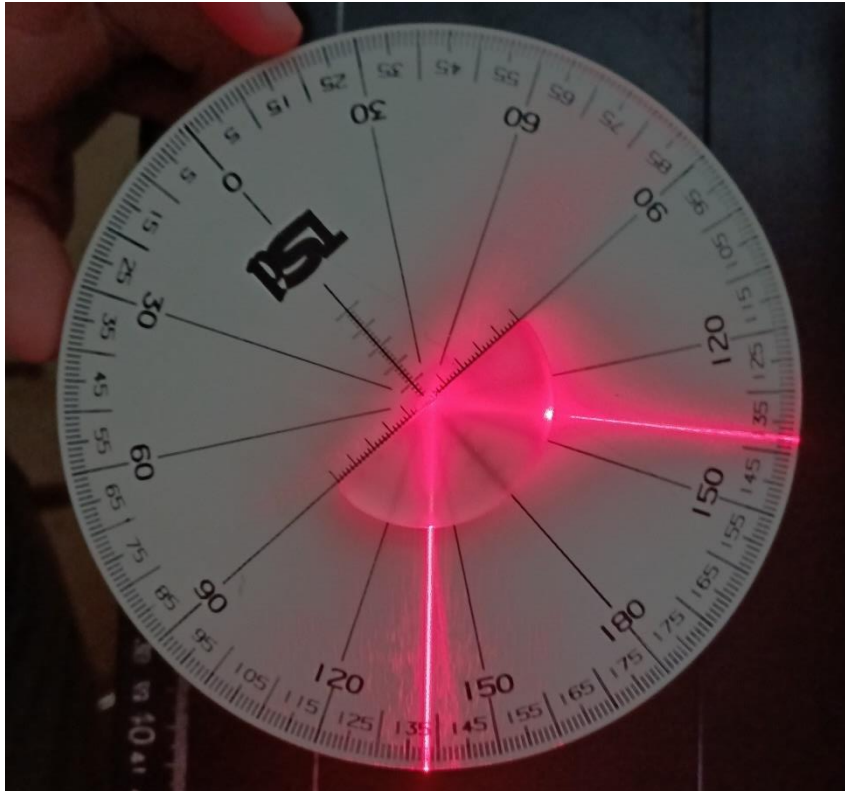
Ecuación 3

Con ello, la representación gráfica de los puntos del seno del rayo refractado frente al incidente nos daría una unión por la línea de tendencia con pendiente del mismo medio. Este resultado lo obtendríamos por la aplicación de los mínimos cuadrados.

Al igual que antes, la incertidumbre que se puede calcular daría valores variantes, si hiciéramos la media de esos valores nos daría un resultado demasiado alto y no realista, así, usaremos la incertidumbre que ya de por sí nos da el método de los mínimos cuadrados.

Parte 1.3 Ángulo límite:

Este subapartado resulta el más corto de realizar y sencillo de todos. Para ello haremos uso del principio del ángulo límite.



Ejemplo de ángulo límite a partir del cual la reflexión es plena.

Este, en palabras, dice que, en el paso de un medio de mayor índice de refracción a uno de menor, hay un ángulo en el que la refracción es máxima (90°) y a partir del cual, si aumentamos el ángulo de incidencia, se dará un efecto de reflexión total. Los cálculos de ello son muy simples:

$$n_x \cdot \text{sen}(\alpha_i) = \text{sen}(\alpha_r) \rightarrow \exists \alpha_{\text{límite}} \leftrightarrow \alpha_r = \frac{\pi}{2} \rightarrow \text{sen}(\alpha_r) = 1$$

Por tanto

$$n_x = \frac{1}{\text{sen}(\alpha_{\text{límite}})}$$

Ecuación 4

Que se toma en una sola medida.

Su incertidumbre vendrá dada por:

$$s(n_x) = \frac{\cos(\alpha_{\text{límite}})}{\text{sen}(\alpha_{\text{límite}})} \cdot s(\alpha_{\text{límite}})$$

Ecuación 5

En el que los ángulos serán representados en radianes.

Parte 2

Consiste en dibujar y analizar la marcha de rayos afectada por una lente convergente y otra divergente. Esto debe resultarnos familiar por los principios de convergencia y divergencia de los rayos provenientes perpendiculares respecto al eje de la lente. Lo analizaremos junto a su teoría en su respectivo momento.

4• Datos y Análisis de Datos

Mostraremos en este punto los datos obtenidos en cada entorno y los resultados de sus análisis. Comenzaremos con la Parte 1 del apartado anterior, pero evaluaremos sus subcategorías para cada uno de los materiales y que así sea más cómodo de leer los datos.

Parte 1

Vidrio:

Parte 1.1 en Vidrio. Incidencia sobre el medio:

El haz de luz incide sobre la cara plana del semicilindro-lente de vidrio, por lo que seguiremos la ecuación 1 como guía.

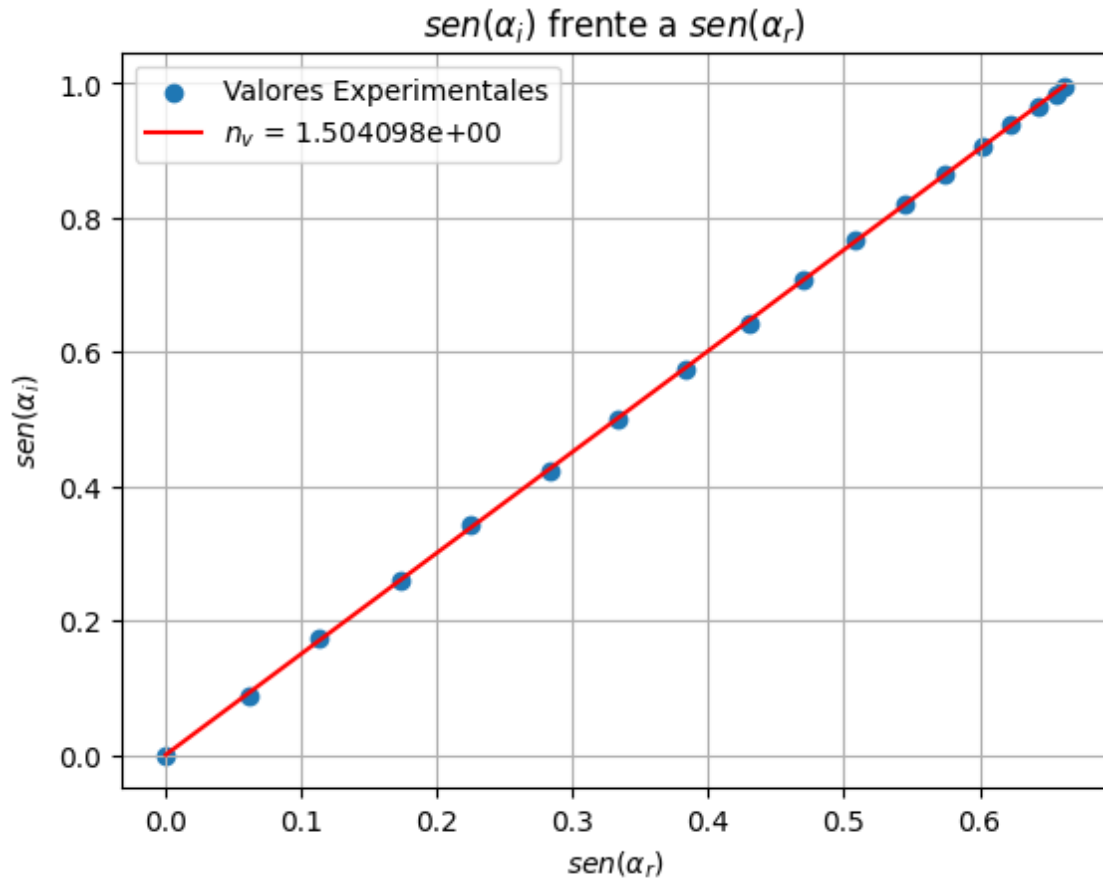
Ángulo Incidente (°) $\pm 1^\circ$	Ángulo refractado (°) $\pm 1^\circ$
0	0
5	3.5
10	6.5
15	10
20	13
25	16.5
30	19.5
35	22.5
40	25.5
45	28
50	30.5
55	33
60	35
65	37
70	38.5
75	40
80	41
85	41.5

Tabla de Ángulos en vidrio.

Ahora tendremos que pasar, tanto el ángulo incidente como el refractado, a radianes. Esto lo haremos directamente en el código en forma de listas combinadas zip() y usando el comando de Python math.radians(). Con esto, podremos ya representar gráficamente el seno del ángulo incidente frente al seno del ángulo refractado, así como,

ejecutando nuestro respectivo código que aplique el método de los mínimos cuadrados, los resultados obtenidos de la regresión lineal.

Generamos la gráfica y una línea de tendencia sin término independiente ya que la propia naturaleza teórica de la recta nos garantiza que pasa por el origen de coordenadas.



Gráfica en vidrio de $\sin(\alpha_i)$ frente a $\sin(\alpha_r)$.

Y los datos obtenidos por el código de regresión lineal por mínimos cuadrados sin término independiente son los siguientes:

n_v:	1.504098
S(n_v):	0.00148307236827431
stdv:	0.0028746968036500458
r:	0.9999917360841409

Lo cual, aplicando sus respectivas cifras significativas, que tomaremos por tres, nos dice que el índice de refracción del vidrio es

$$n_{\text{vidrio}} = 1,50 \pm 0,01$$

En una recta con una constante de regresión lineal muy buena.

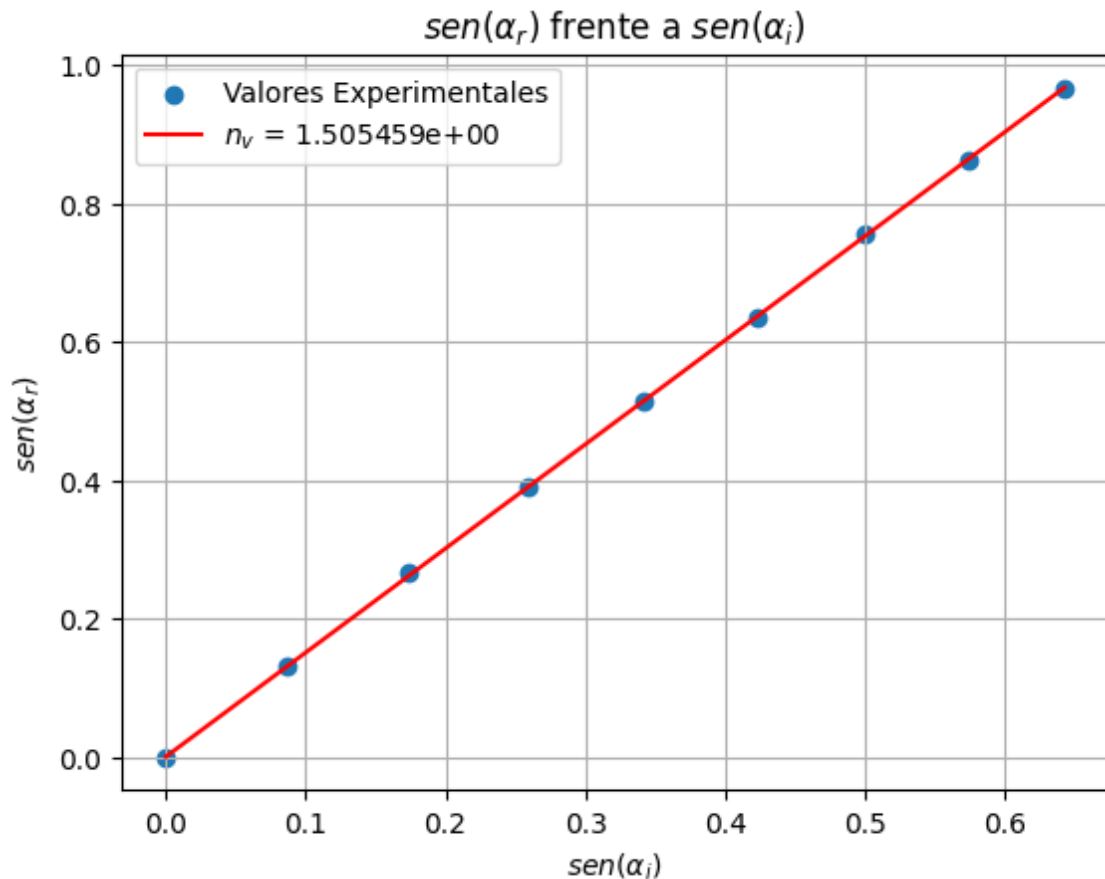
Parte 1.2 en Vidrio. Incidencia desde el medio:

Ahora el procedimiento cambia en que el rayo de luz incide sobre la cara curva de la lente, por ello la fórmula a utilizar será la de la ecuación 3 y habrá que representar el ángulo refractado (el seno de tal) frente al incidente. Por lo demás, todo se realizará como antes.

Ángulo Incidente (°) ±1°	Ángulo refractado (°) ±1°
0	0
5	7.5
10	15.5
15	23
20	31
25	39.5
30	49
35	59.5
40	75

Tabla de Ángulos en vidrio.

Volvemos a proceder con la gráfica y su ajuste por mínimos cuadrados sin término independiente.



Gráfica en vidrio de $\text{sen}(\alpha_r)$ frente a $\text{sen}(\alpha_i)$.

Con datos nuevos que esta vez escope el programa directamente como:

n_v: 1.505459e+00

S(n_v):	0.002033574241459756
stdv:	0.0023996925050404727
r:	0.9999927014360385

Es decir, un índice de refracción de:

$$n_{\text{vidrio}} = 1,50 \pm 0,01$$

Parte 1.3 Vidrio. Ángulo límite:

Buscamos manualmente, con el rayo incidente sobre la cara curva para que la luz vaya del vidrio al aire, aquel ángulo en el que este se refracte 90° respecto a la normal. Cuando lo encontremos usamos la ecuación 4 para encontrar el índice de refracción del vidrio y la ecuación 5 para calcular su incertidumbre.

Así es que medimos lo siguiente

Ángulo Incidente ($^\circ$) $\pm 1^\circ$	Ángulo refractado ($^\circ$) $\pm 1^\circ$
42	90

Ángulo límite en el vidrio.

Y aplicado a sus ecuaciones, que procesará el programa, tenemos de resultado:

n_v:	1.4944765498646086
S(n_v):	0.029039991676152257

Es decir:

$$n_{\text{vidrio}} = 1,49 \pm 0,03$$

Agua:

Parte 1.1 en Agua. Incidencia sobre el medio:

Colocamos en un recipiente con forma de medio cilindro el líquido a evaluar, que en este caso será el agua. En esta primera parte, apuntamos con el láser a la cara plana como ya bien sabemos que hacemos siempre en la parte 1.1.

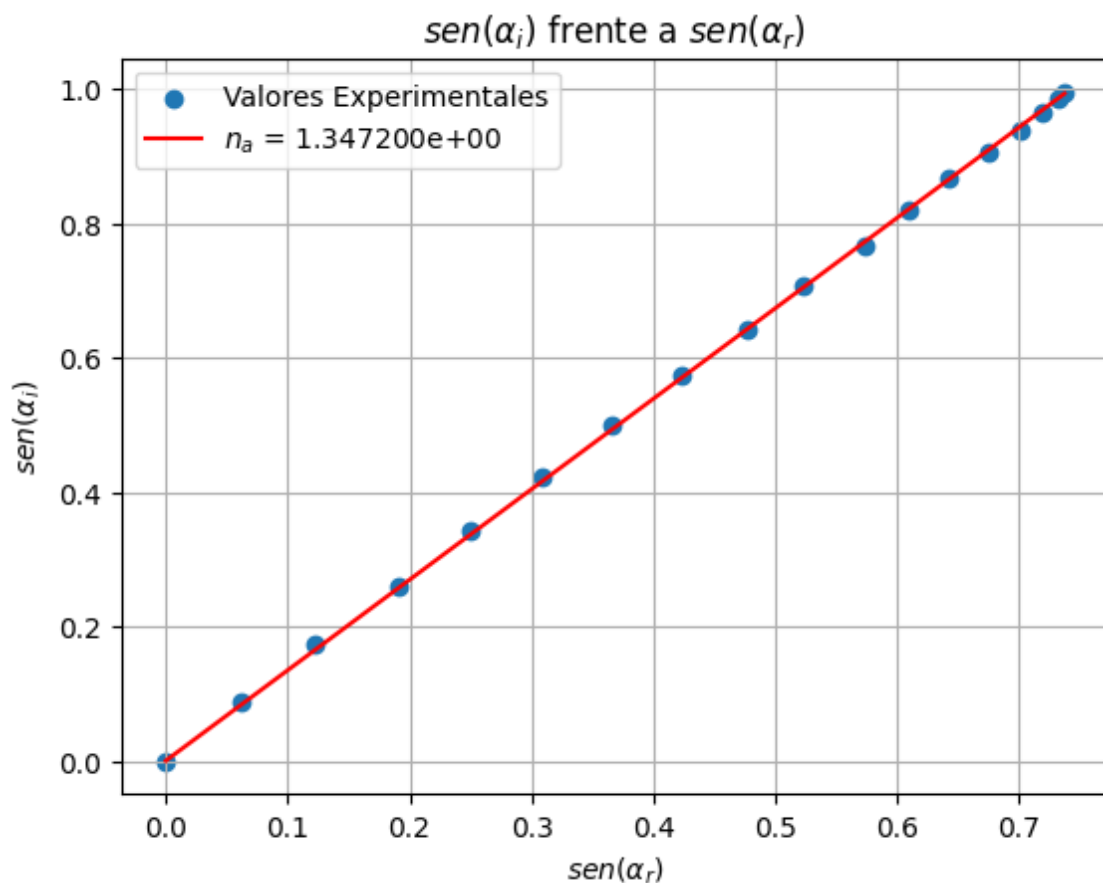
Obtenemos los siguientes datos:

Ángulo Incidente ($^\circ$) $\pm 1^\circ$	Ángulo refractado ($^\circ$) $\pm 1^\circ$
0	0
5	3.5
10	7

15	11
20	14.5
25	18
30	21.5
35	25
40	28.5
45	31.5
50	35
55	37.5
60	40
65	42.5
70	44.5
75	46
80	47
85	47.5

Tabla de Ángulos en agua.

Gráficamente con el método de regresión lineal con mínimos cuadrados y su gráfica y recta sin término independiente, tendríamos:



Gráfica en agua de $sen(\alpha_i)$ frente a $sen(\alpha_r)$.

Con los siguientes datos de la regresión:

n_a:	1.347200e+00
------	--------------

S(n_a): 0.0020849046928151068

stdv: 0.00451185199734164

r: 0.99997964298435

De forma aplicada, quedaría:

$$n_{agua} = 1,35 \pm 0,01$$

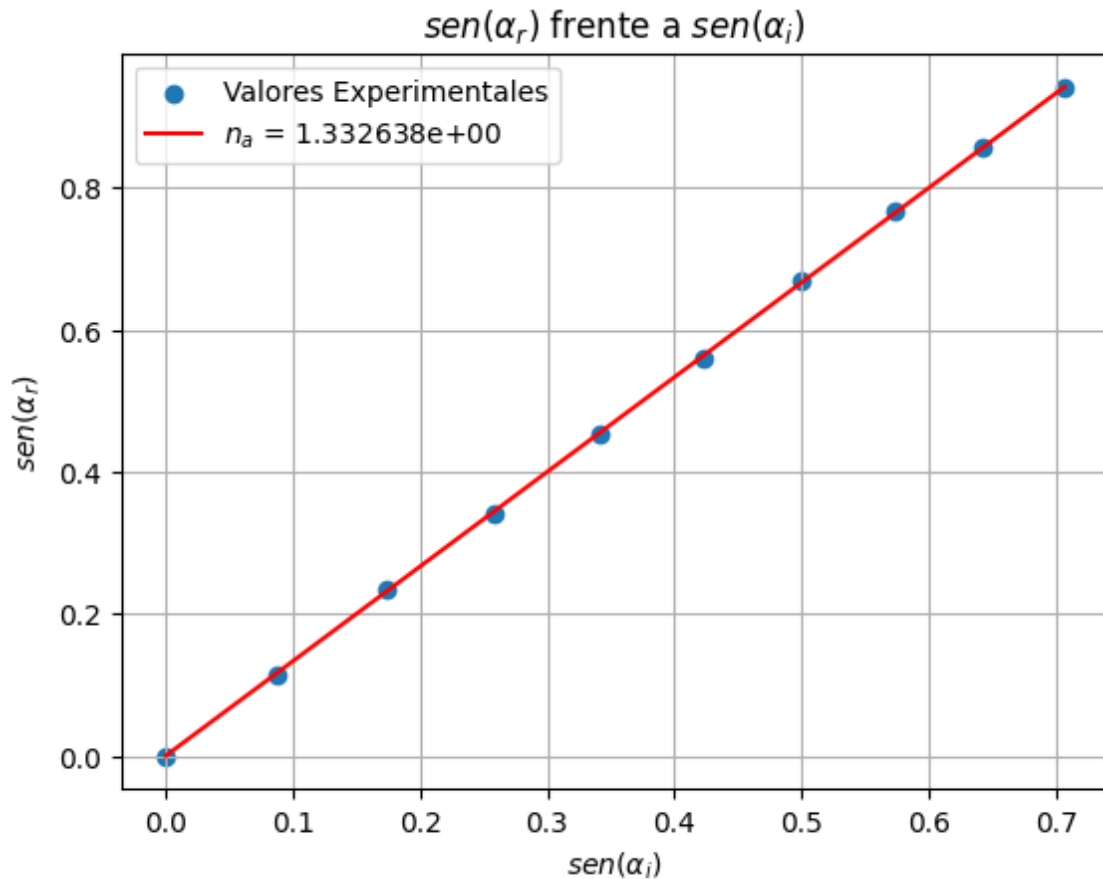
Parte 1.2 en Agua. Incidencia desde el medio:

Giramos el recipiente para que el rayo provenga por la cara curva y seguimos con el procedimiento ya conocido y repetido.

Ángulo Incidente (°) ±1°	Ángulo refractado (°) ±1°
0	0
5	6.5
10	13.5
15	20
20	27
25	34
30	42
35	50
40	59
45	70.5

Tabla de Ángulos en agua.

Con una representación gráfica de la refracción frente a la incidencia.



Gráfica en agua de $\text{sen}(\alpha_r)$ frente a $\text{sen}(\alpha_i)$.

Y los datos de la regresión:

n_a:	1.332638e+00
S(n_a):	0.0017401038363657876
stdv:	0.0023938206456711095
r:	0.999992327555231

Valor final reducido a sus cifras significativas:

$$n_{\text{agua}} = 1,33 \pm 0,01$$

Parte 1.3 Agua. Ángulo límite:

Volvemos a buscar el ángulo límite en la forma habitual pero esta vez con el recipiente con agua y con el láser llegando por la cara curva.

Ángulo Incidente (°) $\pm 1^\circ$	Ángulo refractado (°) $\pm 1^\circ$
48.5	90

Ángulo límite en el agua.

Que resulta que, tras sus operaciones, devuelve:

n_a: 1.3351924182467427

S(n_a): 0.02069050119478826

Lo cual sería interpretado como:

$$n_{agua} = 1,34 \pm 0,02$$

Alcohol:

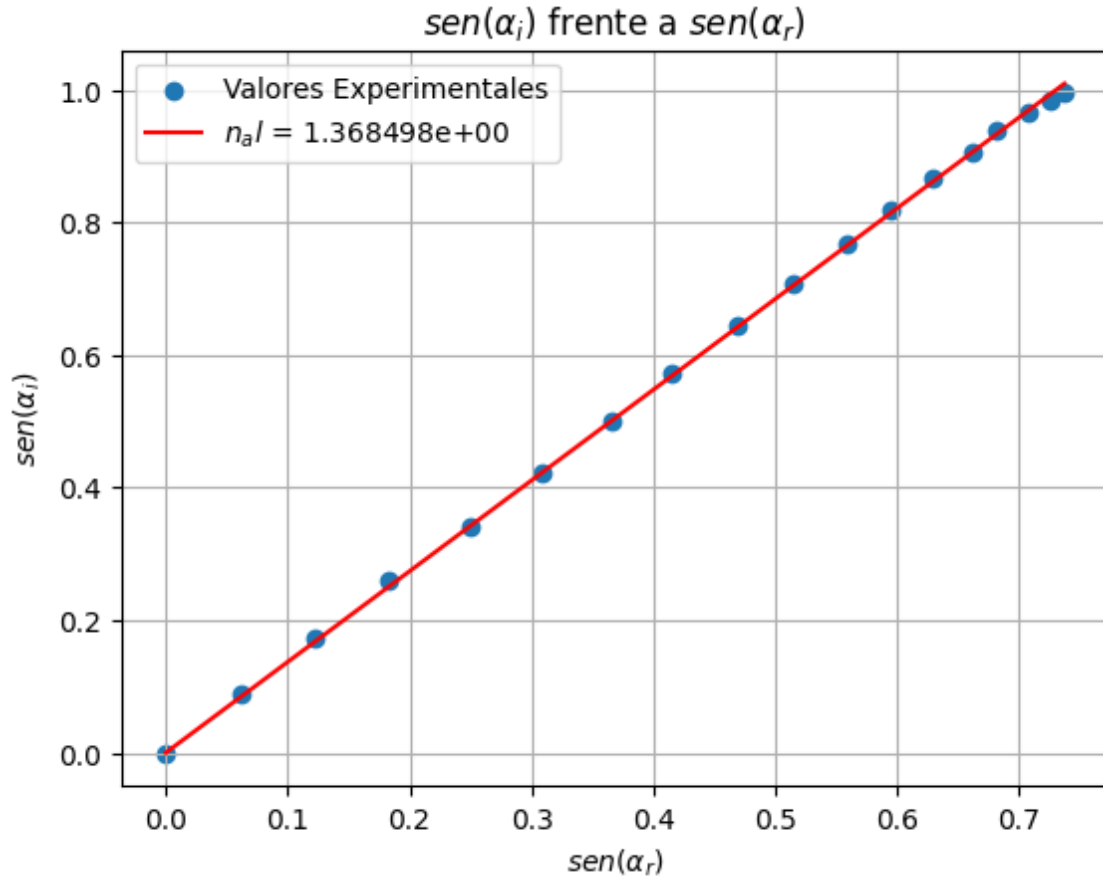
Parte 1.1 en Alcohol. Incidencia sobre el medio:

Colocamos todo de manera usual y tomamos medidas.

Ángulo Incidente (°) $\pm 1^\circ$	Ángulo refractado (°) $\pm 1^\circ$
0	0
5	3.5
10	7
15	10.5
20	14.5
25	18
30	21.5
35	24.5
40	28
45	31
50	34
55	36.5
60	39
65	41.5
70	43
75	45
80	46.5
85	47.5

Tabla de Ángulos en alcohol.

Se vería, en forma gráfica, de la siguiente manera:



Gráfica en alcohol de $\text{sen}(\alpha_i)$ frente a $\text{sen}(\alpha_r)$.

Y con el ya repetido método de los mínimos cuadrados en su regresión sin término independiente, encontramos:

n_al:	1.368498e+00
S(n_al):	0.002578932468897507
stdv:	0.0054940461703779355
r:	0.9999698150011107

Así que el alcohol tendría un índice de refracción aproximado de:

$$n_{alcohol} = 1,37 \pm 0,01$$

Parte 1.2 en Alcohol. Incidencia desde el medio:

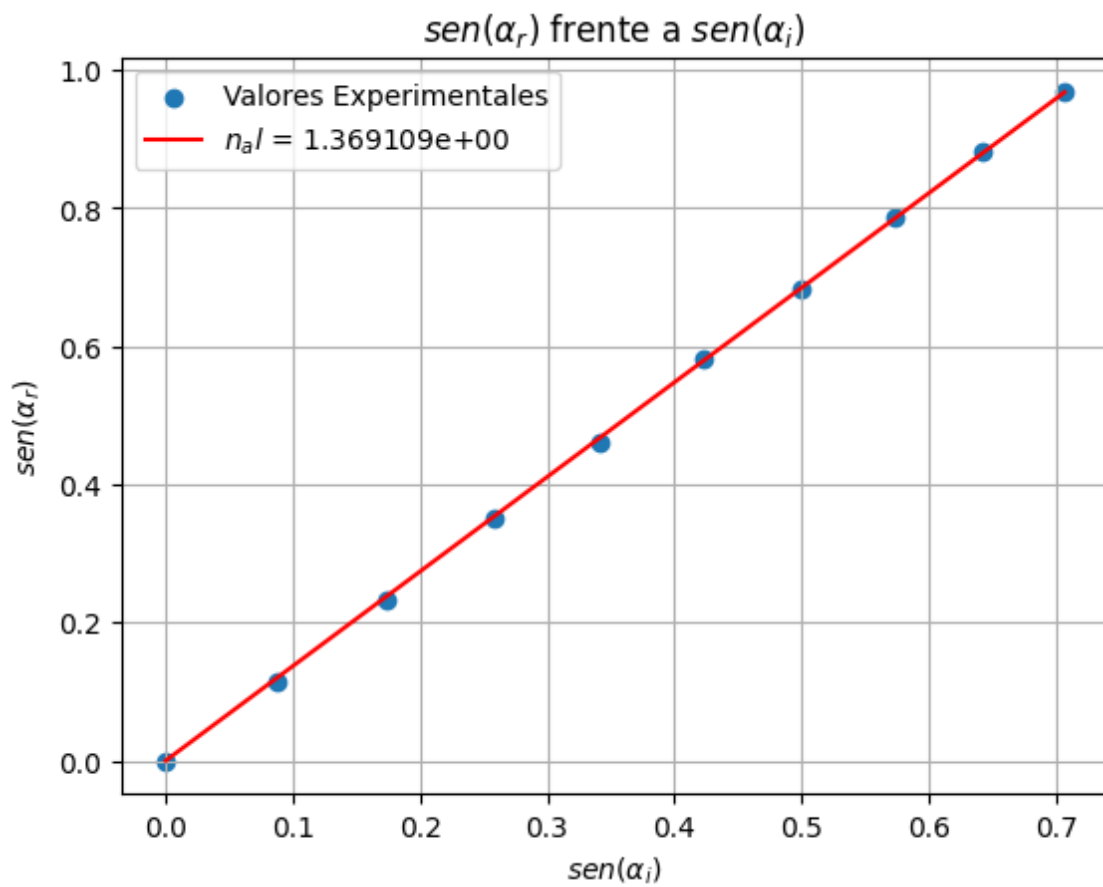
Al igual que en todas las veces, situamos la cara curva del recipiente con alcohol hacia el rayo incidente.

Ángulo Incidente (°) ±1°	Ángulo refractado (°) ±1°
0	0
5	6.5

10	13.5
15	20.5
20	27.5
25	35.5
30	43
35	52
40	62
45	76

Tabla de Ángulos en alcohol.

Con su representación gráfica inversa al del apartado anterior para obtener el índice de refracción del alcohol.



Gráfica en alcohol de $\text{sen}(\alpha_r)$ frente a $\text{sen}(\alpha_i)$.

Y los datos de la regresión:

n_al:	1.369109e+00
S(n_al):	0.002938785149362876
stdv:	0.004042818834552408
r:	0.9999792671707077

Entonces podríamos representar el índice de refracción del alcohol como:

$$n_{alcohol} = 1,37 \pm 0,01$$

Parte 1.3 Alcohol. Ángulo límite:

A mano y con precisión, pero cuidado, buscamos el ángulo a partir del cual sólo se da reflexión en el medio alcohol, así obtenemos:

Ángulo Incidente (°) $\pm 1^\circ$	Ángulo refractado (°) $\pm 1^\circ$
47	90

Ángulo límite en el alcohol.

Y operando con nuestro código y ejecutándolo:

```
n_al: 1.3673274610985953
```

```
S(n_al): 0.022447086625532076
```

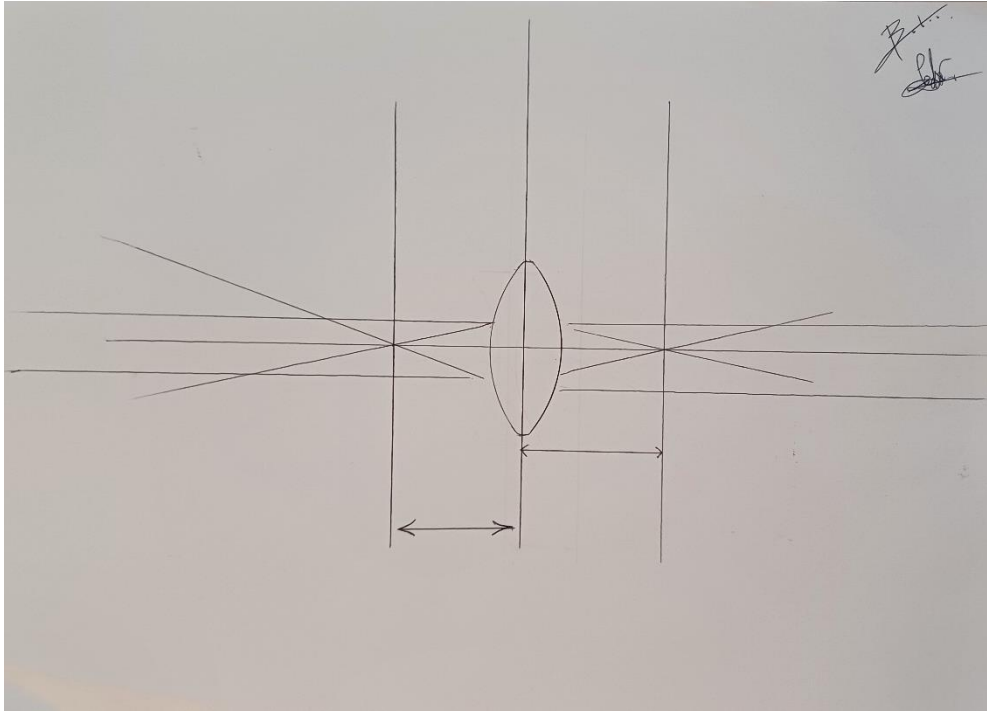
Así, es visible y razonable escribir lo siguiente:

$$n_{alcohol} = 1,37 \pm 0,02$$

Parte 2

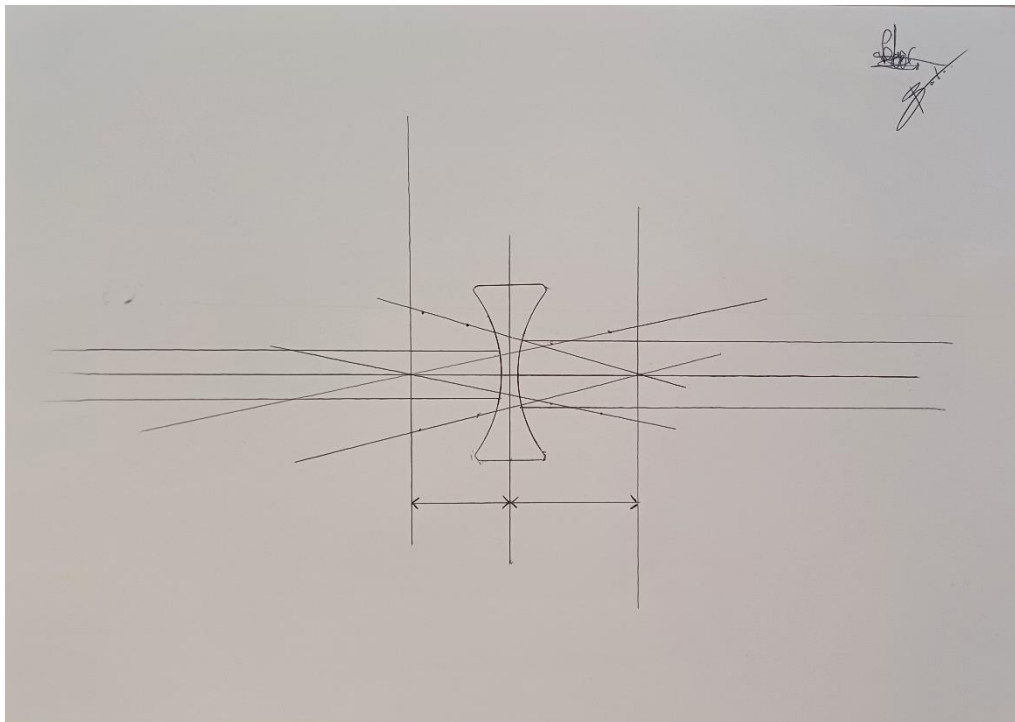
Primero, en el banco óptico, y con ayuda de los imanes, situaremos un folio blanco de forma que este esté bien fijado. A continuación, colocamos la lente convergente y, apoyándonos en ella para que no se mueva, dibujamos su contorno en el folio, así como una línea perpendicular a su eje que pase por el centro.

Tras ello, situamos de nuevo la lente en su dibujo y, con ayuda del láser, proyectamos haces de luz paralelos a la línea que recorre el papel tal que estos incidan sobre la lente y converjan a un punto. Cada una de estas rectas la dibujaremos con cuidado con regla y bolígrafo. Este proceso se realizará por los dos lados de la lente, así, serán dibujados los puntos de convergencia, que resulta ser el foco y podremos encontrarlo al ser el punto donde se cruzan las rectas.



Plano gráfico de rayos sobre lente convergente.

Con la lente divergente haremos lo mismo con el añadido de que para calcular el foco lo haremos de forma distinta: los rayos paralelos, al cruzar la lente, se alejaran entre ellos, por lo que deberemos “extenderlos” virtualmente hacia atrás (hacia el foco, que está en dirección a la fuente de luz) alargando sus rectas hasta que se crucen en un punto; este punto será el foco.



Plano gráfico de rayos sobre lente divergente.

Con los focos encontrados en ambas lentes, los marcamos y dibujamos rectas perpendiculares a la base y que pasen por estos puntos y habremos indicado el principio básico de los tipos de lente en óptica geométrica.

Como detalle, es posible observar que los focos en ambas caras de las lentes son ligeramente distintos.

5. Conclusión

Parte 1

Los resultados, todos agrupados en una misma tabla serían los siguientes:

Medio	Vidrio	Agua	Alcohol	
n_x Índice de refracción	Aire→Medio	$1,50 \pm 0,01$	$1,35 \pm 0,01$	$1,37 \pm 0,01$
	Medio→Aire	$1,50 \pm 0,01$	$1,33 \pm 0,01$	$1,37 \pm 0,01$
	Ángulo Límite	$1,49 \pm 0,03$	$1,34 \pm 0,02$	$1,37 \pm 0,02$

Y resulta que para todos los valores de cada medio hay un rango de coincidencia, por ello se podrían considerar valores muy aceptables, comparémoslo ahora con los reales para cada medio:

Medio	Vidrio	Agua	Alcohol
n_x Índice Refracción	1,50	1,33	1,36

Que son valores que todos están en el rango de su debido apartado. Podríamos dar por resuelta en forma de resultados muy buenos esta parte del experimento.

Menciones a tener en cuenta que podría aumentar o disminuir indirectamente los valores respecto a los reales son: la calidad y pureza del vidrio, que puede variar entre distintas piezas; la temperatura, que sobre todo para el agua y el alcohol puede alterar de forma centesimal notablemente (el ambiente de laboratorio estaría a unos 20°C o más, lo que, en el agua por ejemplo, nos podría casi llegar a dar 1,34 en vez de 1,33 como índice de refracción); la pureza del agua, que no estaba destilada y, finalmente, la graduación del alcohol (siendo de 96° en nuestro caso).

Parte 2

Mediante la observación de los planos dibujados, podemos ver de forma clara la actuación de las lentes sobre los rayos incidentes, mostrándonos las características de ambas, siendo el foco de la lente convergente situado en la zona saliente del rayo y, en las divergentes, en la zona entrante. Esto se confirma y observa perfectamente.

6. Bibliografía

- *Wikipedia contributors. (2024c, abril 22). Refractive index. Wikipedia.*
https://en.wikipedia.org/wiki/Refractive_index#Typical_values