

# Práctica #1

## Simulaciones de los fenómenos de reflexión y refracción de la luz

Kaled Sequeira — kaledseq@estudiantec.cr — 2020061166,  
Javier Fernández — jjavierf64@estudiantec.cr — 2020425930

### 1. INTRODUCCIÓN

Para apreciar el mundo visible de forma profunda es necesario recurrir a la rama de la física denominada óptica, la cual se encarga de estudiar el comportamiento de la luz y otras ondas electromagnéticas. La óptica y el conocimiento de las propiedades de la luz son de suma importancia en la ciencia y la ingeniería. [1] Dentro de los aspectos más importantes de la óptica geométrica es necesario que se incluya la reflexión y la refracción, de los cuales se basa gran parte de esta primera práctica.

La representación de los principios de reflexión y refracción de la luz se puede analizar el siguiente ejemplo. Cuando la luz incide en una interfase lisa que separa dos materiales transparentes como pueden ser aire y vidrio, o agua y vidrio la onda se refleja parcialmente y también se refracta hacia el segundo material. Esto se puede observar en la figura 1 donde el material A y B son diferentes, además se observa de forma clara los distintos rayos del fenómeno a estudiar.

En la Figura 1 se pueden observar como el ángulo de incidencia se denomina  $\theta_a$ , el ángulo de reflexión se denomina  $\theta_r$ , y el ángulo de refracción se denomina  $\theta_b$ . Las leyes de reflexión y refracción se pueden representar utilizando las siguientes ecuaciones. [1]

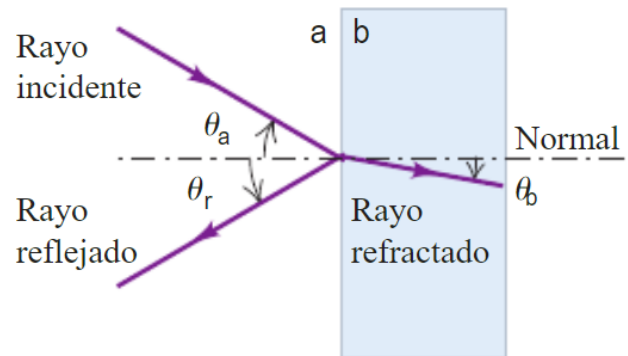


Figura 1: Diagrama de los principios que incluye ángulos de incidencia, reflexión y refracción. [1]

$$n_a \sin(\theta_a) = n_b \sin(\theta_b) \quad (\text{ley de refracción}) \quad (2)$$

Es necesario comentar acerca del índice de refracción de los materiales, denominado por la letra  $n$ , para esclarecer los conceptos de reflexión y refracción. El índice de refracción de un material óptico se determina como la razón entre la rapidez  $c$  de la luz en el vacío y la rapidez  $v$  de la luz en el material. [1]

$$\theta_r = \theta_a \quad (\text{ley de reflexión}) \quad (1)$$

$$n = \frac{c}{v} \quad (3)$$

Cuadro 1: Sustancias y su índice de refracción.  
[1]

Sustancia	Índice de refracción, $n$
Aire	1.003
Agua	1.333
Hielo	1.309
Cuarzo	1.544
Vidrio	1.52
Diamante	2.417
Sal de roca	1.544
Etanol	1.36

Se puede observar en la tabla 1, los índices de refracción de distintos materiales en forma de ejemplo.

El índice de refracción no depende únicamente de la sustancia, también depende de la longitud de onda de la luz. Esta dependencia se denomina dispersión. Esta dependencia es únicamente relacionada con la longitud de onda ya que la frecuencia de esta no varía. Esto se puede determinar mediante la siguiente ecuación, donde  $\lambda$  es la longitud de onda del material en el medio y  $\lambda_0$  es la longitud de onda del material en el vacío.

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n} \quad (4)$$

Es importante mencionar que el fenómeno de dispersión se relaciona con la formación de los arco iris ya que este se produce cuando un rayo de luz se refracta en algún medio, el rayo al ser compuesto se separa en sus colores constituyentes. Al atravesar las gotas de aguas con luz, estas se comportan como un prisma óptico.

Por último para esta práctica se analiza en que consiste el fenómeno de reflexión interna total. Bajo ciertas circunstancias, toda la luz se puede reflejar en una interfase, sin que se transmita nada de ella, aun si el segundo material es transparente. La reflexión interna total solo ocurre si el índice de refracción del material  $B$  dado por  $n_b$  es mayor al del material  $A$  dado por  $n_a$  y además el rayo incide en un ángulo  $\theta$  mayor a  $\theta_{crit}$ .

De esta manera, se define que el ángulo crítico  $\theta_{crit}$  se da en la incidencia de la luz entre dos materiales cuando  $\theta_b$  es  $90^\circ$ . Así, a partir

La reflexión interna total ocurre solo si  $n_b < n_a$ .

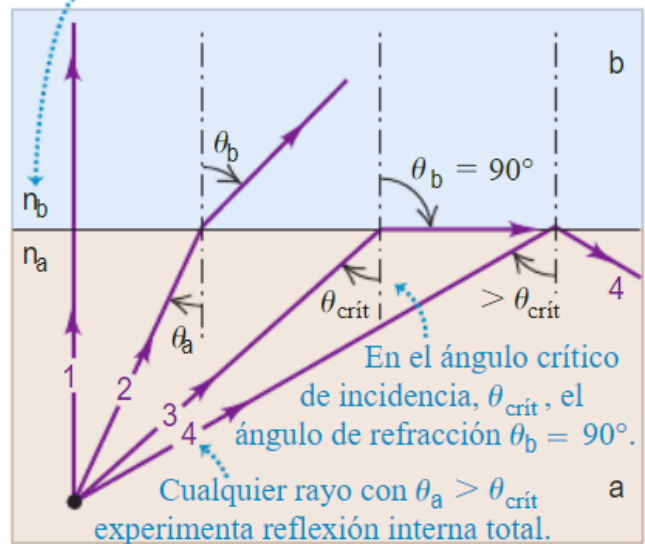


Figura 2: Figura con las condiciones de la reflexión interna. [1]

de la ecuación (2) se obtiene la expresión del ángulo crítico.

$$\text{sen } \theta_{crit} = \frac{n_b}{n_a} \quad (5)$$

Para la medición de los índices de refracción de los materiales sólidos o líquidos se pueden utilizar equipos como los refractómetros. Existen dos tipos manuales y digitales, la mayor diferencia es que para operar un refractómetro manual es necesario que se realice por una persona capacitada para no comprometer la exactitud de los resultados y los digitales tienen menor influencia por el operador. [2]

La reflexión interna total tiene diversas aplicaciones, entre ellas la más conocida es la fibra óptica utilizada para transmitir información en forma de pulsos de luz mediante fibras por largas distancias.

Para esta práctica se tienen como objetivos conocer las plataformas educativas de simulación computacional para la experimentación de fenómenos físicos, utilizar simulaciones computacionales para comprender los principios físicos asociados con los fenómenos de reflexión y refracción de la luz, explorar con el simulador las condiciones en las que se produce la reflexión total interna, conocer algunas apli-

caciones de los principios de reflexión y refracción de la luz, así como otros fenómenos ópticos relacionado y por último identificar fenómenos ópticos cotidianos que se puedan explicar con los principios de reflexión y refracción de la luz.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para la realización del experimento se utilizó la plataforma virtual PhET de parte de la Universidad de Colorado. Dicha plataforma contiene varias simulaciones en ámbitos de física, química, biología, etc. Y es de acceso público y libre por medio del portal <https://phet.colorado.edu/>.

En el caso de la presente práctica se utilizó la simulación "Bending Light", tomando las distintas herramientas que se brindan en la plataforma para la recolección de datos. Algunos ejemplos de la toma de datos en la plataforma se encuentran en las Figuras 3, 4 y 5.

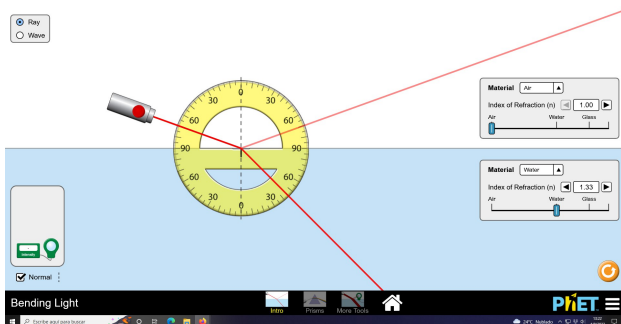


Figura 3: Prueba de ángulos de incidencia y reflexión.

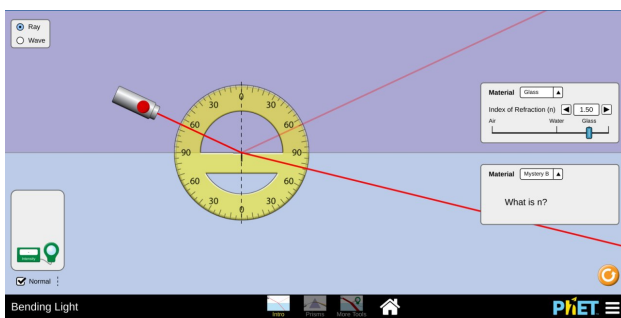


Figura 4: Prueba de ángulos de incidencia y reflexión.

Además, se confeccionó un programa de Python que pudiera tomar los datos registrados

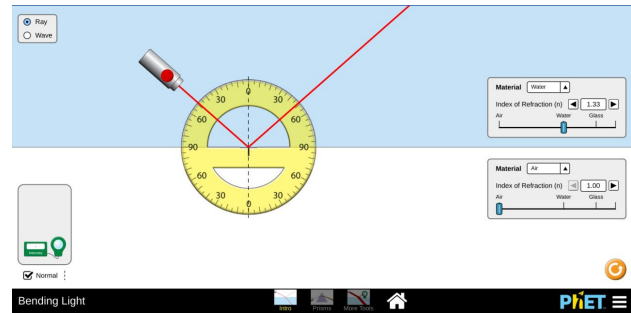


Figura 5: Prueba de ángulos de incidencia y reflexión.

y realizar un análisis de los mismos, así como generar gráficos que permitieran visualizar mejor dichos datos. El programa se encuentra alojado en un repositorio de GitHub [https://github.com/jjavierf64/Proyectos\\_Optica/](https://github.com/jjavierf64/Proyectos_Optica/) y se le asignó una licencia de código abierto GPL v.3 para el uso libre del mismo.

Parte de lo que realiza el programa en su análisis matemático es el método de mínimos cuadrados para hallar la pendiente y la intersección en el eje de las ordenadas de una serie de datos que se comporten cercanos a una función lineal.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Reflexión

Como primera parte del procedimiento se analizó el principio de reflexión. Se utilizó la plataforma PhET para estudiar el fenómeno. Como primer acercamiento se probó la plataforma y la simulación para familiarizarse con la herramienta. Posteriormente se realizaron las mediciones del ángulo de reflexión e incidencia según las instrucciones brindadas. A partir de las mediciones realizadas se generó la figura 6.

Como se puede observar los resultados de la figura anterior van de acuerdo con la ecuación (1) que describe los ángulos de incidencia y reflexión. Como se observa se cumple que los ángulos de incidencia son iguales a los ángulos de reflexión, por lo que el experimento concuerda con la teoría estudiada.

### Refracción

Para el caso de la refracción, se obtuvieron los datos presentados en el Cuadro 2 para los

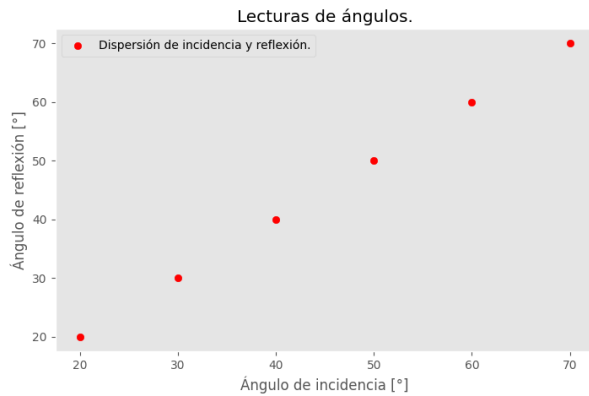


Figura 6: Gráfica de ángulos de incidencia y reflexión.

medios Aire-Agua. A partir de dichos datos se generó un gráfico de dispersión del ángulo de refracción en función del ángulo de incidencia; dicho gráfico se presenta en la Figura 7.

Cuadro 2: Ángulos de incidencia y refracción medidos para el rayo entre Aire y Agua.

Ángulo de Incidencia [°]	Ángulo de Refracción [°]
20	14
30	22
40	28
50	35
60	40
70	44

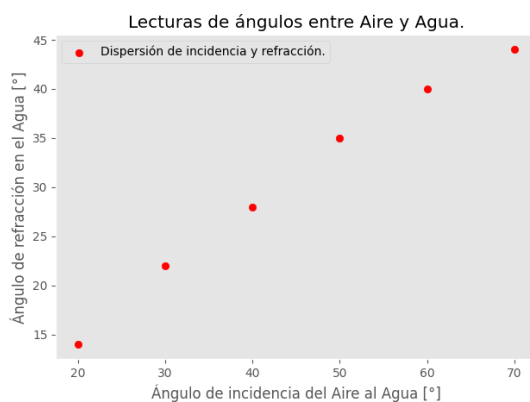


Figura 7: Lecturas de ángulos de incidencia y refracción en los medios Aire y Agua.

Como se observa en los resultados, la relación entre los ángulos no parece ser lineal, por lo que se procede a hacer un cambio de variable de la manera:

$$\begin{cases} Y = \text{sen } \theta_{\text{agua}} \\ X = \text{sen } \theta_{\text{aire}} \\ m = \frac{n_{\text{aire}}}{n_{\text{agua}}} \end{cases}$$

Por lo que la ecuación 2 se transformaría en una ecuación lineal de la forma:

$$Y = mX$$

Así, se obtienen los nuevos datos, aplicado el cambio de variable, y se presentan en el Cuadro 3.

Cuadro 3: Ángulos de incidencia y refracción medidos para el rayo entre Aire y Agua.

Seno del Ángulo de Incidencia	Seno del Ángulo de Refracción
0.3420	0.2419
0.5000	0.3746
0.6428	0.4695
0.7660	0.5736
0.8660	0.6428
0.9397	0.6946

A partir de los nuevos datos se utiliza el método de mínimos cuadrados en el programa realizado y se calcula el valor de la pendiente de la recta formada en el cambio de variable de tal manera que:

$$m_{\text{Aire, Agua}} = 0,7552$$

Entonces, en la Figura 8 una gráfica de dispersión que contemple una recta de ajuste para dichos datos.

Y considerando los valores conocidos para los índices de refracción de ambos materiales, como se muestran en el Cuadro 1, se define el valor teórico como:

$$m_{\text{Aire, Agua, Teorico}} = \frac{n_{\text{aire}}}{n_{\text{agua}}} = \frac{1,003}{1,333} = 0,7524$$

Por lo que se calcula el porcentaje de error para el resultado experimental obtenido.

Luego, se sigue el mismo procedimiento para el caso de los medios de Aire y el medio misterioso A, considerando los datos del Cuadro 5 y el gráfico de la Figura 9.

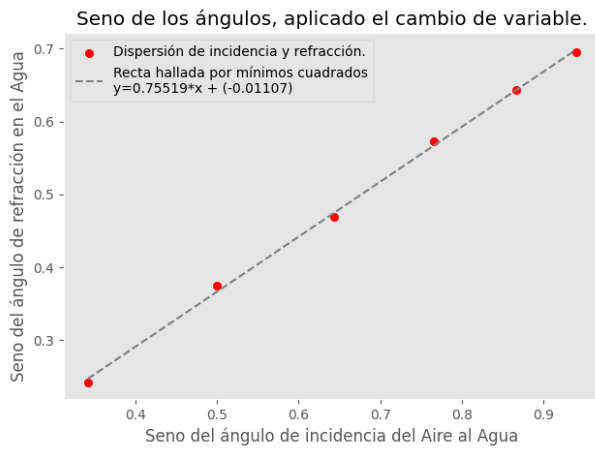


Figura 8: Gráfico de dispersión del seno de los ángulos de incidencia y refracción en los medios Aire y Agua aplicado el cambio de variable.

Cuadro 4: Resultados de la medición experimental y valor teórico de la relación entre índices de refracción.

Pendiente Experimental	Pendiente Teórica	Porcentaje de Error
0.7552	0.7524	0.0037 %

Al aplicar un cambio de variable similar al caso anterior, se obtienen los datos del Cuadro 6.

Se aplica el método de mínimos cuadrados para obtener el valor de la pendiente tal que:

$$m_{Aire, MysteryA} = 0,4329$$

Y se confecciona el gráfico de la Figura 10, que considera los datos del cambio de variable y la recta de ajuste generada por el método de mínimos cuadrados.

Entonces, se utiliza el valor del índice de refracción conocido del aire para determinar dicho índice para el material misterioso A.

$$m_{Aire, MysteryA} = \frac{n_{aire}}{n_{MysteryA}}$$

$$0,4329 = \frac{1,003}{n_{MysteryA}}$$

$$n_{MysteryA} = \frac{1,003}{0,4329} = \mathbf{2.3169}$$

Cuadro 5: Ángulos de incidencia y refracción medidos para el rayo entre Aire y medio misterioso A.

Ángulo de Incidencia [°]	Ángulo de Refracción [°]
20	7
30	12
40	15
50	17
60	21
70	23

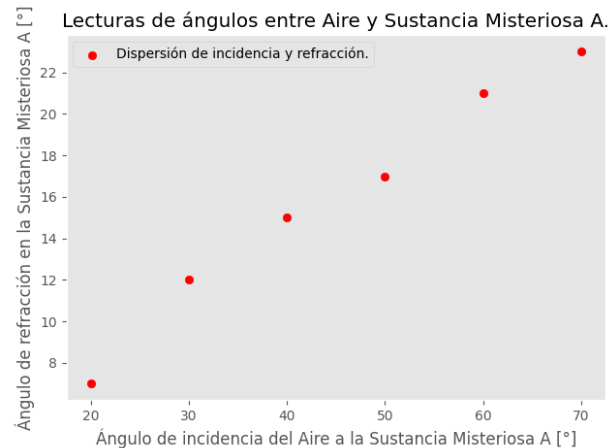


Figura 9: Lecturas de ángulos de incidencia y refracción en los medios Aire y Misterioso A.

Finalmente, se siguen los mismos pasos para el caso de los medios de Vidrio y el medio misterioso B, tomando los datos del Cuadro 7, y el gráfico de la Figura 11.

Se aplica el cambio de variable del caso anterior, y se obtienen los resultados del Cuadro 8.

Asimismo, se aplica el método de mínimos cuadrados para obtener el valor de la pendiente tal que:

$$m_{Vidrio, MysteryB} = 1,1128$$

Y se confecciona el gráfico de la Figura 12, que considera los datos del cambio de variable y la recta de ajuste generada por el método de mínimos cuadrados.

Entonces, se utiliza el valor del índice de refracción conocido del vidrio según el Cuadro 1 para determinar dicho índice para el material misterioso B.

Cuadro 6: Ángulos de incidencia y refracción medidos para el rayo entre Aire y el medio misterioso A.

Seno del Ángulo de Incidencia	Seno del Ángulo de Refracción
0.3420	0.1219
0.5000	0.2080
0.6428	0.2588
0.7660	0.2924
0.8660	0.3584
0.9397	0.3907

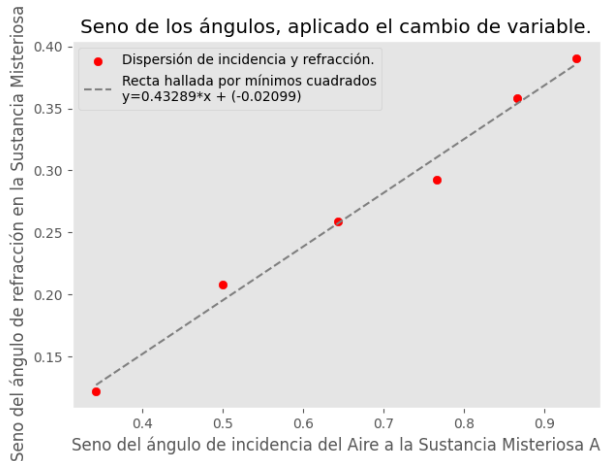


Figura 10: Gráfico de dispersión del seno de los ángulos de incidencia y refracción en los medios Aire y Misterioso A aplicado el cambio de variable.

$$n_{Vidrio, MysteryB} = \frac{n_{vidrio}}{n_{MysteryB}}$$

$$1,1128 = \frac{1,520}{n_{MysteryB}}$$

$$n_{MysteryB} = \frac{1,520}{1,1128} = \mathbf{1.3659}$$

### Reflexión Total Interna

El primer sistema seleccionado fue uno de Agua y Aire. Al intentar obtener a mano el ángulo crítico con la incidencia desde el aire hacia el agua, no se logró encontrar un ángulo en que se reflejara toda la luz (que fuese menor a 90°). En cambio, al cambiar la orientación, tomando la incidencia desde el agua hacia el aire, se midió un ángulo crítico de aproximadamente 49°.

Cuadro 7: Ángulos de incidencia y refracción medidos para el rayo entre Vidrio y medio misterioso B.

Ángulo de Incidencia [°]	Ángulo de Refracción [°]
20	20
30	31
40	43
50	55
60	67
65	76

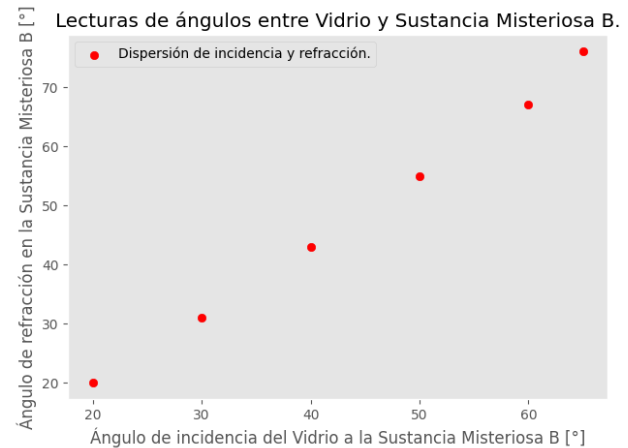


Figura 11: Lecturas de ángulos de incidencia y refracción en los medios Vidrio y Misterioso B.

Ello se explica por medio de la teoría, ya que al cambiar el orden de los medios, también debería cambiar el orden de los índices en la ecuación (5), pero al ser el índice de uno de los medios mayor al otro (en este caso es  $n_{Agua} > n_{Aire}$ ), entonces no se tendría solución para dicha ecuación si se invierte el orden de los índices; debido a que la relación entre índices sería mayor a 1.

Considerando la ecuación (5), y los datos del Cuadro 1, resulta que:

$$\theta_{crit, Agua-Aire} = \sin^{-1} \left( \frac{n_{Aire}}{n_{Agua}} \right) = \sin^{-1} \left( \frac{1,003}{1,333} \right)$$

$$\theta_{crit, Agua-Aire} = \mathbf{48.802^\circ}$$

Luego, se presenta el resumen de datos y el porcentaje de error en comparación al valor teórico en el Cuadro 9.

Por lo que se observa que el valor experimental es bastante cercano al valor calculado para el primer sistema.



Cuadro 8: Ángulos de incidencia y refracción medidos para el rayo entre Aire y el medio misterioso A.

Seno del Ángulo de Incidencia	Seno del Ángulo de Refracción
0.3420	0.3420
0.5000	0.5150
0.6428	0.6820
0.7660	0.8192
0.8660	0.9205
0.9063	0.9703

Cuadro 9: Resultados de la medición experimental y valor teórico del ángulo crítico de un rayo que incide de agua a aire.

Ángulo Crítico Experimental [°]	Ángulo Crítico Teórico [°]	Porcentaje de Error
49	48.802	0.00405 %

Cuadro 10: Resultados de la medición experimental y valor teórico del ángulo crítico de un rayo que incide de vidrio a agua.

Ángulo Crítico Experimental [°]	Ángulo Crítico Teórico [°]	Porcentaje de Error
63	61.279	0.02808 %

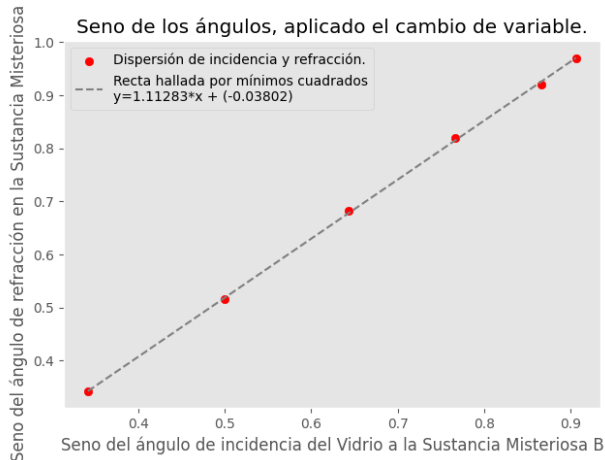


Figura 12: Gráfico de dispersión del seno de los ángulos de incidencia y refracción en los medios Vidrio y Misterioso B aplicado el cambio de variable.

Para el siguiente sistema se utilizaron los medios Agua y Vidrio. En la incidencia desde el agua al vidrio no se registró ángulo crítico; hecho que concuerda con la explicación del caso anterior. Y para la incidencia del vidrio al agua, se midió un ángulo de  $63^\circ$ . De nuevo, tomando la ecuación (5), y los datos de los índices del Cuadro 1, resulta:

$$\theta_{crit,VidrioAgua} = \sin^{-1} \left( \frac{n_{Agua}}{n_{Vidrio}} \right) = \sin^{-1} \left( \frac{1,333}{1,52} \right)$$

$$\theta_{crit,Vidrio-Agua} = 61.279^\circ$$

Así, se presenta el resumen de datos en el Cuadro 10.

Por lo que se observa que el valor experimental en este caso se aleja un poco más que en el caso anterior, pero sigue teniendo un porcentaje de error bastante bajo.

## Análisis General

En términos de la importancia práctica de los conocimientos estudiados previamente, se puede establecer que las leyes de la óptica resultan muy útiles para las personas ingenieras que, por ejemplo, se desarrollen en el área de telecomunicaciones, ya que las comunicaciones de radio, televisión, satélites, etc. utilizan la luz como herramienta para dicha comunicación. Por lo tanto, es importante que se conozcan las propiedades y los fenómenos con el fin de evitar problemas en la comunicación, o incluso crear mejores maneras de efectuarla por este mismo medio.

Además, es posible aplicar dichos conocimientos a la tecnología de la información y la computación; como ocurre con la tecnología de la fibra óptica. La cual impulsa significativamente las velocidades límite para la intercomunicación de computadores al aprovechar el fenómeno de reflexión total interna para utilizar la luz como medio de comunicación. Por lo que se deben conocer los aspectos de distintos materiales, e incluso formas y estructuras de los mismos, que influyen en el comportamiento de la luz.

## 4. CONCLUSIONES

Para esta práctica se tenía como objetivo conocer las plataformas educativas de simulación computacional para la experimentación

de fenómenos físicos, por lo que al utilizar la plataforma virtual PhET de la Universidad de Colorado como herramienta para la realización del experimento, se cumplió el objetivo planteado.

Además se buscaba utilizar simulaciones computacionales para comprender los principios físicos asociados con los fenómenos de reflexión y refracción de la luz, al implementar la plataforma virtual con la simulación "Bending Light" se utilizó para recolectar datos y analizarlos usando la teoría de la ley de reflexión y refracción. De esta forma se cumplió con el segundo objetivo de la práctica.

En particular, se logró también observar los fenómenos físicos de la luz aplicados en las simulaciones de la plataforma; y de tal manera relacionar el conocimiento teórico y las fórmulas conocidas con su representación real", tomando en cuenta que se trata de una simulación. E incluso se aplicó dicho conocimiento para determinar el índice de refracción de dos materiales misteriosos, y así poder hacerse una idea del material del que se podría tratar.

## REFERENCIAS

- [1] Sears F, Zemansky M., Young H., and Freedman A., *Física universitaria Volumen 2*, 13th ed. México, D.F.: Pearson Educación, 2003.
- [2] LaboratoriosEycó, "Calibración brix/Índice de refracción," 2020.