

# Espectroscopia de gas excitado de Mercurio

H.Leal<sup>\*</sup>, P.Verdejo<sup>\*\*</sup>, and M.Zuñiga<sup>\*\*\*</sup>

Pontificia Universidad Católica de Valparaíso

22 de mayo de 2023

## Resumen

En esta experiencia de laboratorio, se investigó el espectro de emisión de un gas excitado a través de técnicas de espectroscopía y el estudio de la interferencia y difracción de un gas excitado de mercurio en una red de difracción de 600 líneas por milímetro. Además, se analizó la expresión analítica para una red de difracción de  $N$  rendijas y se discutió la aparición de máximos principales para diferentes números de rendijas (2 y 3).

Experimentalmente, se discutió el proceso completo desde la toma de datos, la interpretación de estos, como procesarlos adecuadamente y luego graficar los resultados, obteniendo líneas de emisión que corresponden al gas excitado de Mercurio. Este estudio proporciona una base sólida para la comprensión de las propiedades de la luz y la espectroscopía aplicada al análisis de gases.

## 1. Introducción

La luz, como fenómeno fundamental en la física, ha sido objeto de estudio durante siglos, y su comprensión ha permitido avances significativos en la ciencia y la tecnología. Con el desarrollo de las ecuaciones de Maxwell en el siglo XIX, se logró una descripción unificada de los fenómenos eléctricos y magnéticos, revelando la naturaleza electromagnética de la luz [6].

A través de la teoría del electromagnetismo, se pudo derivar una ecuación de ondas que describe el comportamiento de la luz y otros fenómenos relacionados, como la interferencia y la difracción[7].

El estudio de la interferencia y la difracción de la luz es esencial para comprender el comportamiento de las ondas electromagnéticas y su interacción con diferentes medios y estructuras. En particular, la interferencia y la difracción en redes de múltiples rendijas permiten analizar patrones de interferencia y obtener información sobre las propiedades de la luz y las fuentes de emisión. Una aplicación importante de estos fenómenos es la espectroscopía, una técnica que permite analizar la composición de sustancias a través de la medición de sus espectros de emisión o absorción[5].

---

<sup>\*</sup> hugo.leal@pucv.cl

<sup>\*\*</sup> pablo.verdejo.c@mail.pucv.cl

<sup>\*\*\*</sup> matias.zuniga.c@mail.pucv.cl

## 2. Marco Teórico

### 2.1. Interferencia y difracción

La interferencia y la difracción son fenómenos que ocurren cuando las ondas electromagnéticas, como la luz, interactúan con diferentes medios y estructuras. La interferencia se refiere a la superposición de dos o más ondas que se propagan en el mismo medio, mientras que la difracción es el fenómeno de dispersión de la luz al pasar a través de una abertura o alrededor de un objeto[7].

### 2.2. Red de difracción de múltiples rendijas

Una red de difracción es una estructura que consta de una serie de rendijas equidistantes, generalmente utilizadas para analizar la composición espectral de la luz. La interferencia y la difracción que ocurren en una red de difracción de múltiples rendijas dan lugar a patrones de interferencia en el plano de observación[3].

Cuando una onda plana incide sobre las  $N$  aperturas equidistantes, separadas por una distancia  $a$ , cada apertura se comporta como una nueva fuente de luz. La superposición de la luz proveniente de las  $N$  rendijas puede ser observada en un punto  $p$  situado a una distancia  $D$  de la red, donde  $D \gg h_p$  y la distancia entre las aperturas es despreciable en comparación con  $D$ [4].

La intensidad luminosa en el punto  $p$  es proporcional al cuadrado del campo eléctrico total en dicho punto. Si cada campo eléctrico puede ser pensado como una onda plana linealmente polarizada de igual amplitud, oscilando en una única dirección y propagándose en la dirección de un único eje, la intensidad en dicho punto es proporcional a:

$$I_p = I_0 \frac{\sin^2\left(\frac{aNk \sin(\theta)}{2}\right)}{\sin^2\left(\frac{ak \sin(\theta)}{2}\right)} \quad (1)$$

Donde  $I_0$  es la intensidad máxima,  $k$  es el número de onda y  $\theta$  es el ángulo de difracción.

### 2.3. Casos particulares: 2 y 3 rendijas

Para el caso de 2 rendijas, la intensidad en un punto de observación bajo las condiciones anteriores está dada por:

$$I = 2I_0 \left(1 + \cos\left(\frac{ak \sin(\theta)}{D}\right)\right) \quad (2)$$

En el caso de 3 rendijas, la intensidad en el punto de observación sigue la misma fórmula general que en el caso de  $N$  rendijas. Sin embargo, al haber 3 rendijas, se observa la aparición de un segundo máximo principal en el patrón de interferencia. Este máximo principal se encuentra en un ángulo  $\theta$  tal que la diferencia de fase entre las ondas provenientes de las rendijas adyacentes sea un múltiplo de  $2\pi$ .

La intensidad de la luz en un punto de observación se calcula de manera similar, tomando en cuenta la superposición de las ondas de las tres rendijas. Si asumimos que las rendijas están igualmente espaciadas y que la intensidad de la luz de cada rendija es la misma, la expresión para la intensidad será:

$$I = 3I_0 \left( 1 + 3 \cos \left( \frac{ak \sin(\theta)}{D} \right) + 2 \cos^2 \left( \frac{3ak \sin(\theta)}{2D} \right) \right) \quad (3)$$

En esta ecuación, el término  $\cos \left( \frac{ak \sin(\theta)}{D} \right)$  representa la interferencia entre las ondas de las tres rendijas y el término  $\cos^2 \left( \frac{3ak \sin(\theta)}{2D} \right)$  representa la interferencia entre las ondas de la rendija central y las rendijas exteriores.

Cuando las ondas de luz de diferentes rendijas llegan a un punto en el espacio, pueden interferir constructiva o destructivamente, dependiendo de la diferencia de fase entre las ondas. En el caso de rendijas igualmente espaciadas, las diferencias de fase dependen del ángulo con respecto a la normal (perpendicular) a las rendijas.

Si las rendijas están igualmente espaciadas con una separación  $d$ , la diferencia de camino entre las ondas de rendijas adyacentes será  $d \sin(\theta)$ . Y si asumimos que la intensidad de la luz de cada rendija es la misma, la amplitud total en un punto será la suma de las amplitudes de las ondas de las tres rendijas.

## 3. Montaje Experimental

### 3.1. Espectroscopía de emisión

La espectroscopía de emisión es una técnica que permite analizar la composición de sustancias mediante la medición de sus espectros de emisión. Cuando un gas es excitado, sus átomos o moléculas emiten luz en longitudes de onda características, que pueden ser utilizadas para identificar el tipo de gas y determinar sus propiedades.

En este laboratorio, se analizó el espectro de emisión de el gas de mercurio utilizando el montaje que se muestra a continuacion:

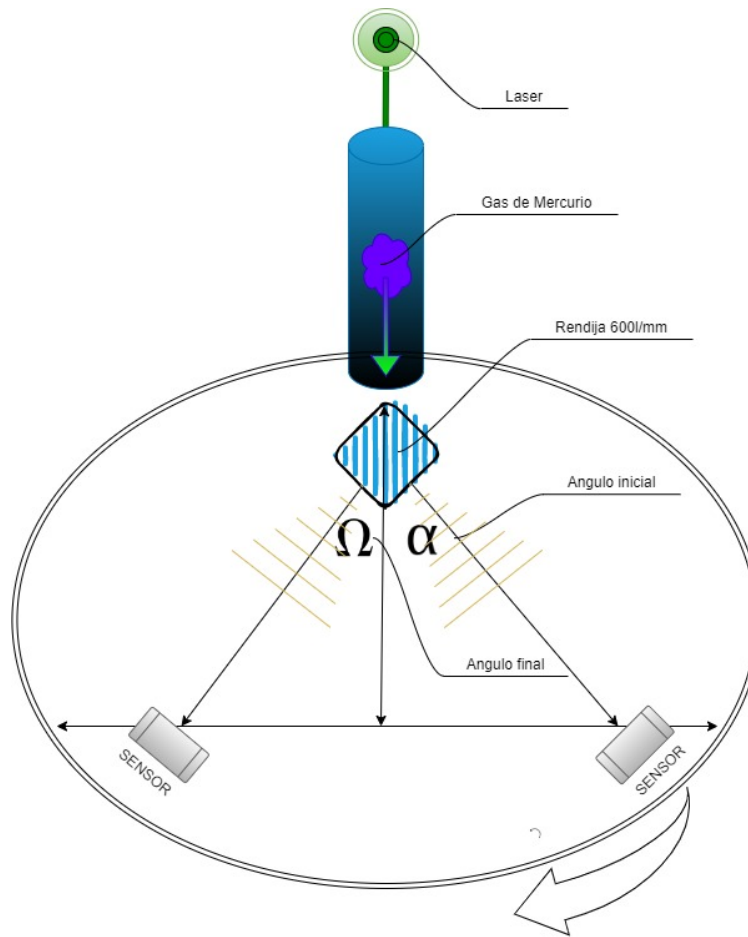


Figura 1: Montaje Experimental

Es importante recalcar que iniciamos la medición con nuestro sensor fotosensible en el angulo  $\alpha$ , que corresponde a un ángulo de  $31.6^\circ$  respecto al centro geometrico, para luego iniciar un barrido en sentido horario, hasta el ángulo  $\Omega$ , estos datos fueron almacenados y transferidos al siguiente repositorio.

## 4. Análisis Experimental

Para llevar a cabo el análisis experimental, se realizó un montaje que incluía una fuente de luz conocida (luz laser verde) , una lampara de gas de mercurio, una red de difracción de 600 líneas/mm y un sensor óptico montado en una base rotacional.

para medir el ángulo de difracción. Se utilizó una interfaz de cómputo para tomar los datos en un ordenador.

La relación entre el ángulo de rotación de la base principal móvil y el brazo del sensor es de **1:59**, por cada vuelta que da el sensor en el montaje exterior, la base del brazo del sensor marcará 59 vueltas.

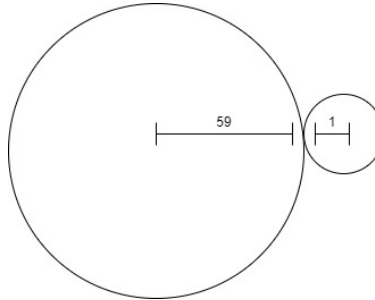


Figura 2: Relación radial en el montaje

Esto es importante a la hora de procesar los datos correctamente.

Se realizaron mediciones de los ángulos de difracción para distintos máximos de intensidad en el patrón de interferencia, generando una tabla de datos con dos columnas, ángulo e intensidad respectivamente.

En este caso cabe recalcar que se inicia desde un ángulo de  $31.6^\circ$  y se barre hacia en sentido horario, el sensor irá midiendo distintas intensidades luminicas a lo largo de su recorrido.

Estos datos fueron recopilados y almacenados en un archivo para su posterior análisis y procesado[2].

#### 4.1. Análisis de datos y gráficas

Utilizando el siguiente código en Python, se analizaron los datos recopilados y se generaron gráficas de los patrones de interferencia observados:

A continuación, se presenta el código usado para procesar los datos en lenguaje en Python[1]:

```

import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np

# Leer el archivo y separar los valores en dos listas: x y y
x = []
y = []

with open("C:\\Users\\hugo\\Documents\\lab 3 ondas\\espectroscopia T1.txt", "r") as file:
    for line in file:
        values = line.strip().split("\t")
        x.append(float(values[0].replace(",",".")))
        y.append(float(values[1].replace(",",".")))

# trabajar datos
x = [dato / 59 for dato in x] #ajustando la diferencia radial del instrumento
x= [dato+31.6 for dato in x] #posicionando correctamente el 0
x=[np.abs(dato) for dato in x] # quitando signo menos de lado derecho
xlongi=[(1670)*np.sin(np.deg2rad(dato)) for dato in x] # ajustando datos de mm a nm

# Graficar los puntos
plt.plot(xlongi, y)
plt.xlabel("Longitud de ondas [NanoMetro]")
plt.ylabel("Intensidad Lumínica [Unidades Arbitrarias]")
plt.title("Intensidad Lumínica / Longitud de onda")
plt.grid(True)
plt.show()

```

Figura 3: Código utilizado

Aquí haremos un paso a paso de como llegamos a la gráfica final ya que no es trivial a pesar de que así se vea. Para empezar sin los ajustes en los datos obtenemos el siguiente resultado:

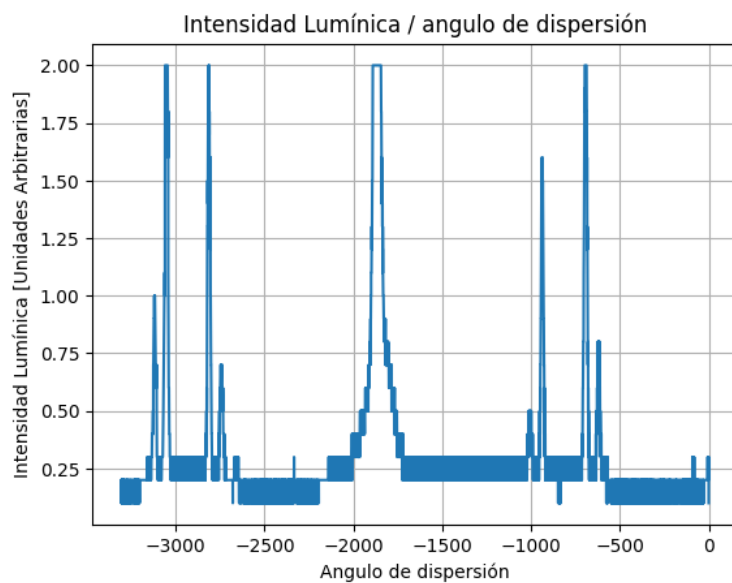


Figura 4: Datos sin procesar

Como se aprecia en la Figura 4, los datos parten desde el  $-3000^\circ$  hasta el 0, para corregir esto debemos aplicar la relación 1:59 a los ángulos; obteniendo lo siguiente:

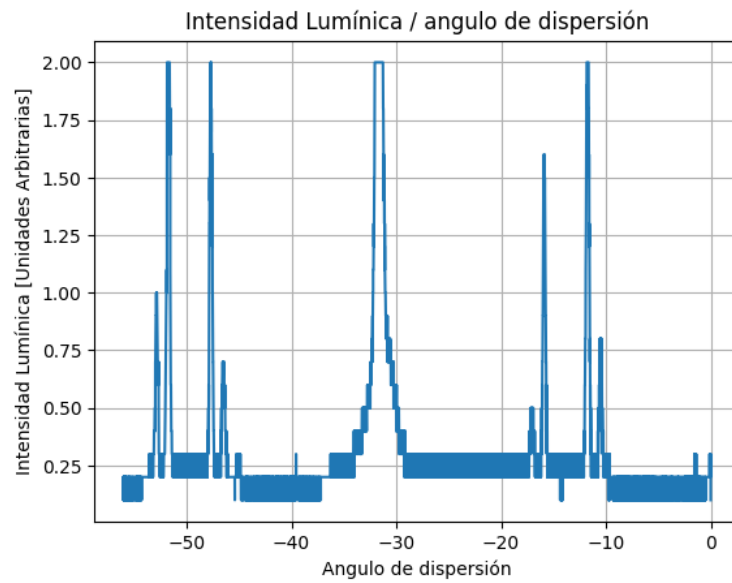


Figura 5: Datos con relacion 1:59

Ahora debemos ajustar el centro del experimento, el ángulo correcto fue de  $31.6^\circ$  siendo que en la práctica definimos el ángulo  $30^\circ$  pero medidos de forma analoga.

Ajustando el centro del experimento a los datos obtenemos:

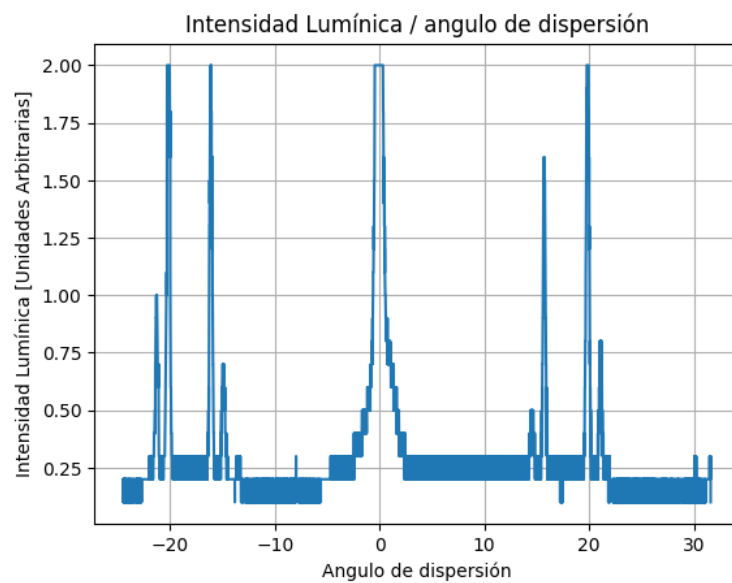


Figura 6: Datos con centro ajustado

En la Figura 6 podemos apreciar como las líneas espectrales se reflejan”de forma simétrica con respecto al centro del experimento,

Para poder obtener las líneas espectrales que buscamos tenemos varios caminos, por ejemplo descartar de plano la mitad de los datos desde el centro hacia la izquierda o hacia la derecha y solo evaluar con la mitad de los datos. Pero también podemos aplicar la función valor absoluto y superponer ambos registros.

A continuación se aplica la función valor absoluto a los datos y se superpone la parte izquierda con la derecha, si la alineación es correcta podemos ver la tendencia de las líneas espectrales:

Obtenemos el siguiente gráfico:

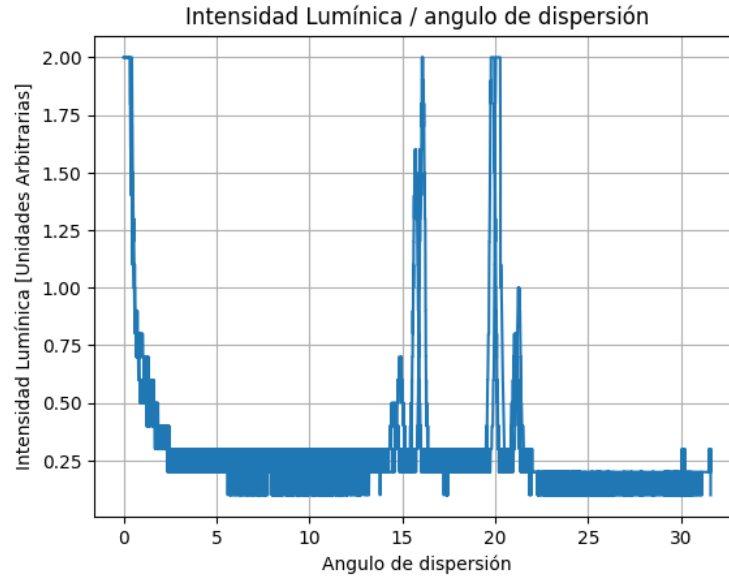


Figura 7: Datos con función valor absoluto

Finalmente debemos hacer la conversión de los ángulos de dispersión a longitud de onda para esto usamos la siguiente fórmula, obtenida de la teoría clásica:

$$\lambda = 2d \sin(\theta) * m \quad (4)$$

- $\lambda$ : Es el símbolo lambda y representa la longitud de onda de la luz.
- $d$ : Es la distancia entre las rendijas o la separación espacial entre las estructuras que causan la dispersión.
- $\theta$ : Es el símbolo theta y representa el ángulo de dispersión.

Tener en cuenta que para nosotros  $d = 1/600$  que aproximadamente es  $1,67e^{-6}$  metros.



Luego el resultado lo queremos ver en nanometros, por consiguiente multiplicamos por un factor  $10^3$ .

La gráfica que obtenemos después del ultimo ajuste es:

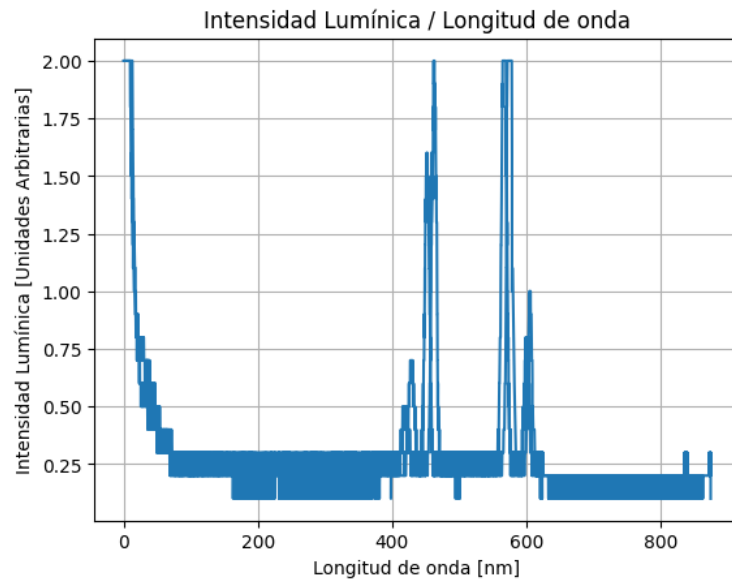


Figura 8: Longitud de onda / Intensidad

Podemos ajustar la metrica de la gráfica para ver mejor el eje X:

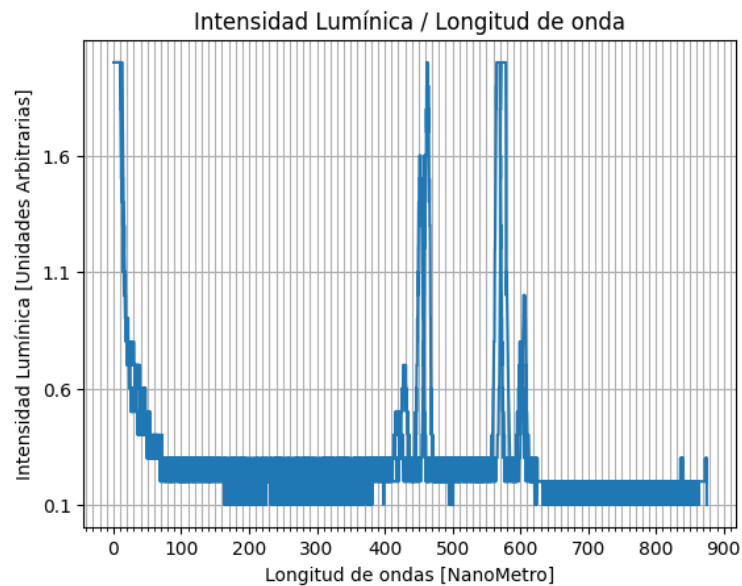


Figura 9: Metrica ajustada

Podemos ver de esto, se observan picos de intensidad en las siguientes longitudes de onda:

- $\lambda_1 \approx$  valor 420 [nm]
- $\lambda_2 \approx$  valor 460 [nm]
- $\lambda_3 \approx$  valor 560 [nm]
- $\lambda_4 \approx$  valor 610 [nm]

## 5. Conclusiones

En este experimento de laboratorio, hemos realizado un estudio de la espectroscopía de emisión del gas de mercurio utilizando un montaje experimental, una red de difracción y un sensor fotosensible.

Hemos logrado registrar los patrones de interferencia en términos de ángulo e intensidad luminosa y transformar esos datos en una gráfica de longitud de onda frente a la intensidad de la luz.

En el proceso de análisis de datos, hemos realizado varias etapas de procesamiento, incluyendo el ajuste de la relación de ángulo de 1:59 debido a la configuración de nuestro montaje, la centralización de los datos en torno al ángulo correcto de  $31.6^\circ$ , la aplicación de la función valor absoluto para superponer las líneas espectrales y finalmente, la conversión de los ángulos de dispersión a longitudes de onda utilizando la fórmula de la teoría clásica.

El resultado final de nuestro análisis es una gráfica clara que muestra la longitud de onda en nanómetros en el eje X y la intensidad lumínica en unidades arbitrarias en el eje Y. En esta gráfica, podemos identificar claramente los picos de intensidad en ciertas longitudes de onda, correspondientes a las líneas espectrales del mercurio.

En particular, hemos identificado picos de intensidad en las siguientes longitudes de onda:

- $\lambda_1 \approx 420$  nm
- $\lambda_2 \approx 460$  nm
- $\lambda_3 \approx 560$  nm
- $\lambda_4 \approx 610$  nm

Estos resultados concuerdan con las longitudes de onda conocidas de las líneas espectrales del mercurio, lo que confirma que nuestro experimento fue exitoso y que nuestra metodología de análisis de datos es sólida y precisa.

Esta experiencia nos ha proporcionado un entendimiento profundo de la espectroscopia de emisión y de cómo las propiedades de la luz y de las sustancias pueden ser analizadas a través de ella. Nos ha permitido aplicar conocimientos teóricos en un contexto práctico y obtener resultados cuantitativos que corresponden a los valores esperados de la literatura.

## Referencias

- [1] Hugo Leal Aranda. *codigo de espectroscopia, Espectroscopia de gas de mercurio*. Abril de 2023. URL: <https://github.com/HugoLealAranda/Optica-y-Ondas/blob/main/patron%20de%20interferencia%20mercurio.ipynb>.
- [2] Hugo Leal Aranda. *Datos experimentales, Espectroscopia de gas de mercurio*. Abril de 2023. URL: <https://github.com/HugoLealAranda/Optica-y-Ondas/blob/main/espectroscopia%20T1.txt>.
- [3] M. Born y E. Wolf. *Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light*. Cambridge University Press, 1999.
- [4] E. Hecht. *Optics*. Pearson Education, 2017.
- [5] G. Kirchhoff y R. Bunsen. “Chemical Analysis by Spectral Observations”. En: *Annalen der Physik* 186 (7 1860), págs. 337-381.
- [6] J. C. Maxwell. *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field*. Royal Society, 1865.
- [7] T. Young. “On the Theory of Light and Colours”. En: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* (1819), págs. 12-48.