

FRANCO :)

Caracterización espectral de una fuente LED y de la absorción de distintas soluciones

Andrew McCallum
awmcc97@gmail.com

Joaquín Sequeira
joaquinetsequeira@gmail.com

Tadeo Rodríguez
tadeorodriguez842@gmail.com

14 de Junio, 2023

En este trabajo se midió el espectro de una fuente de luz utilizando múltiples dispositivos ópticos, principalmente una red de difracción. Se analizó el patrón de difracción producido por la red y se calcularon las longitudes de onda correspondientes a los diferentes máximos de intensidad observados. Además, se estudió el espectro generado luego de atravesar diferentes muestras de sustancias absorbentes.

1. Introducción

La espectroscopia es una rama de la física que se encarga del estudio de las variaciones del comportamiento de la radiación electromagnética para sus distintas longitudes de onda. El análisis espectral es fundamental en diversas áreas, como la astrofísica, la química y la física de materiales, ya que permite caracterizar las propiedades de las sustancias a través de su espectro.

Cuando la luz blanca, compuesta por una amplia gama de frecuencias, interactúa con un material, este puede absorber, reflejar o transmitir ciertas longitudes de onda. Estas interacciones dan lugar a un espectro de luz característico que puede ser analizado para obtener información valiosa sobre la composición y estructura del material en cuestión.

Un espectrómetro es un instrumento con la capacidad de analizar y medir el espectro de frecuencias de la luz a la cual es expuesto. Una de las técnicas más comunes en la espectrometría óptica es la de dispersión. Con esta técnica los frentes de onda de diferentes longitudes son separados, por ejemplo, mediante la refracción al pasar por un prisma o la difracción. En este último caso, conviene utilizar una red de difracción, un dispositivo óptico que consta de una serie de rendijas o surcos paralelos muy próximos entre sí, que actúan como pequeñas fuentes de ondas secundarias. Cuando la luz incide sobre una red, estas ondas secundarias interfieren entre sí, produciendo patrones de interferencia, que son diferentes según la longitud de onda, generando la dispersión.

El patrón de intensidades generado por una red de N rendijas se puede escribir como [1]

$$I = I_0 \cdot \text{sinc}^2\left(\frac{\delta}{2}\right) \cdot \frac{\sin^2\left(\frac{N\delta}{2}\right)}{\sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right)},$$

con

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot d \cdot \sin(\theta),$$

donde a es la distancia entre las rendijas y θ es el ángulo en que se mide la intensidad. Se puede ver también que el patrón de intensidades depende de la longitud de onda λ . A partir de esto se puede calcular la posición angular de los máximos de intensidad, que con incidencia normal del haz en la red es normal resulta

$$\sin \theta_m = \frac{m\lambda}{d} = y/D,$$

Donde m es el número de orden de difracción, y es la posición en la pantalla y D es la distancia entre la red y la pantalla. Si se mira un mismo orden de difracción (en este trabajo se observará solo el primero), se obtiene una relación lineal entre la posición del máximo en la pantalla y la longitud de onda que le corresponde. Por lo que si la dispersión es tal que los máximos son distinguibles se puede asignar a cada posición en la pantalla una longitud de onda.

La ley de Malus estipula la relación entre la intensidad de la luz que entra y sale de un polarizador, si entra linealmente polarizada. La misma está dada por

$$I = I_0 \cos^2 \theta, \quad (1)$$

donde I_0 es la intensidad del haz entrante y θ el ángulo entre la polarización del haz y el polarizador. Esto se puede reproducir para luz naturalmente polarizada, como es el caso de la mayoría de las fuentes LED, agregando un polarizador previo para que llegue lineal al segundo.

Una de las características de los materiales que se estudia mediante la espectroscopia es la absorbancia. La absorbancia es la propiedad de ciertos materiales por la cual absorben ciertas longitudes de onda, disminuyendo así la intensidad de la luz. Está definida como

$$A = -\ln \frac{I(\lambda)}{I_0(\lambda)}, \quad (2)$$

dónde I_0 es la intensidad de determinada longitud de onda de la luz antes de atravesar el material, e I es la intensidad luego de atravesarlo. Además, para un material absorbente, de acuerdo con la ley de Beer-Lambert, es posible escribir a la absorbancia como

$$A = \epsilon(\lambda)lc, \quad (3)$$

donde c es la concentración de una sustancia en una muestra, y l es el largo de esta. El coeficiente de absorción molar $\epsilon(\lambda)$, es propio de la sustancia y depende de λ

En este trabajo se buscó armar y calibrar un espectrómetro con el fin de luego utilizarlo para analizar las longitudes de onda absorbidas por líquidos con distintas concentraciones de colorante. Para ello se armó un dispositivo experimental que proyectaba la dispersión de la luz incidente sobre una pared, formando un espectro que era luego fotografiado y analizado para compararlo con un espectro estándar.

Yo sé que es sobre la pared, pero digan que es sobre una pantalla

2. Desarrollo experimental

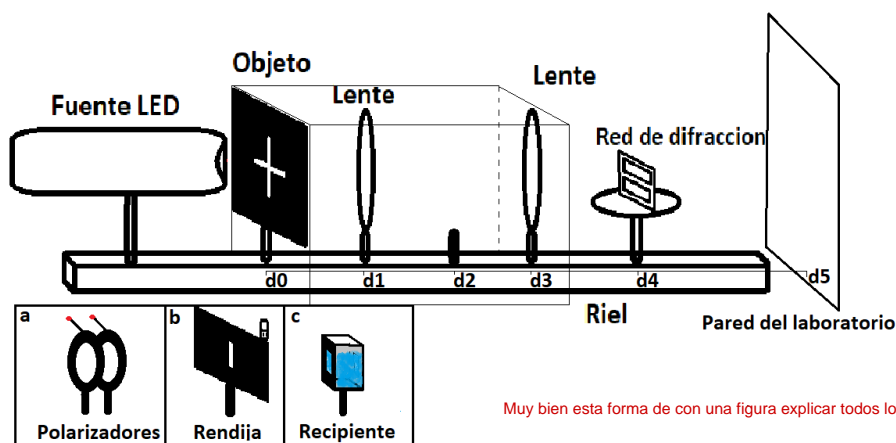
El trabajo consistió en 3 partes. Primero se buscó el rango lineal de la respuesta de la cámara utilizada. Luego con esa información se calibró el dispositivo que se iba a utilizar. Y más tarde, con el dispositivo calibrado se realizó el experimento sobre la absorbancia.

Finalmente,

Previo a armar el experimento se utilizó un espectrómetro de Thor Labs para medir el espectro de la fuente LED. Esto se utilizó más tarde para la calibrar el dispositivo experimental. 'sistema experimental detallado en la Figura 1'

Con el objetivo de observar el rango lineal del detector se diseñó el siguiente experimento (figura 1). Se colocó una fuente LED cubierta por una máscara en forma de cruz en $d_0 = (5,6 \pm 0,1)$ cm. A una distancia d_1 se colocó una lente que formaba imagen en la pared a una distancia $d_5 = (165,7 \pm 0,1)$ cm. Consecuentemente se colocaron a una distancia d_2 dos polarizadores. En la figura 1 se ve una red de difracción y otro lente que no fueron utilizados para la primera parte del experimento. Se dejó fijo un polarizador y se rotó el otro, tomando fotos a la imagen que se formaba en la pared, cada $(5 \pm 1)^\circ$. Además se midió la estabilidad temporal de la fuente utilizando un detector en el centro de la imagen.

Cuidado que acá hablan del sistema experimental, pero todavía no lo mostraron. Primero se muestra y luego hablan de él.



Muy bien esta forma de con una figura explicar todos los experimentos!

Figura 1: Se puede observar en la figura la fuente LED con la máscara, seguida por la primera lente en d_1 . En d_2 se puede observar la ubicación de distintos elementos dependiendo de la configuración experimental correspondiente. Con a) se caracterizó la linealidad de las intensidades medidas por la cámara; con b) se realizó la calibración del espectrómetro y con b) y c) juntos se realizó el experimento de absorción. También se ve la segunda lente en d_3 y la red de difracción en d_4 . Se distingue desde d_0 hasta d_3 la caja montada alrededor del sistema para disminuir la intensidad medida relacionada a los haces no deseados.

Se calculó la resolución del dispositivo experimental a partir del ancho del espectro a medir $\Delta\lambda = 370$ nm, de la cantidad de píxeles que conforman el espectro $P_{esp} = 460px$, y la cantidad de píxeles en la imagen de la rendija $P_{rend} = 33px$. Este último valor se obtuvo al mirar el orden 0 de difracción. Los valores de los píxeles

se calcularon utilizando el software de procesamiento digital de imágenes ImageJ. La resolución aproximada es $R = \frac{\Delta\lambda}{P_{esp}} P_{rend}$. Se obtuvo $R = 27 \text{ nm}$. Bien, pero no entendí para que usaron P_{rend}

Luego, con el objetivo de calibrar el dispositivo experimental, se removieron los polarizadores y se movió la primera lente a una distancia $d_1 = (14,2 \pm 0,1) \text{ cm}$ buscando que esta forme imagen sobre la rendija de ancho $a = (0,15 \pm 0,01) \text{ cm}$ ubicada a una distancia $d_2 = (27,8 \pm 0,1) \text{ cm}$. Se colocó una segunda lente a una distancia $d_3 = (38,1 \pm 0,1) \text{ cm}$ que formaba imagen sobre la pared del laboratorio, a una distancia $d_5 = (165,7 \pm 0,1) \text{ cm}$ de la red. Entre la segunda lente y la pared se colocó, en $d_4 = (79,5 \pm 0,1) \text{ cm}$, la red de difracción sobre la cual incidían los rayos. Se buscó para este objeto óptico una distancia justa para maximizar la resolución. Se eligió un punto medio entre la cercanía a la segunda lente para asegurar que se iluminen la mayor cantidad de rendijas y la cercanía a la pared para asegurar que se viesan correctamente los órdenes de difracción. Desde la fuente y el objeto hasta la segunda lente se colocó arriba y a ambos lados del sistema unas planchas de cartón negro para disminuir la cantidad de luz que incidía en la pared sin pasar por la red. Se procedió a fotografiar el primer orden de difracción, para analizarlo con ImageJ para comparar el perfil de intensidades con el medido por el espectrómetro, y encontrar la relación lineal entre la posición en la imagen (en píxeles) y la longitud de onda a la cual correspondía el orden de difracción.

Una vez calibrado el dispositivo, se agregó, después la rendija en d_2 , un ~~sostén de recipientes~~ ^{'porta cubetas'} en el cual se depositaban distintos frascos de sección cuadrada con lados de longitud $l = (1,0 \pm 0,1) \text{ cm}$. Estos contenían soluciones de colorante azul o rojo en agua con distintas concentraciones. Para el azul se utilizaron $c_{a1} (0,020 \pm 0,004)$, $c_{a2} = (0,074 \pm 0,004)$, $c_{a3} = (0,107 \pm 0,005)$, $c_{a4} = (0,138 \pm 0,006)$, $c_{a5} = (0,194 \pm 0,007)$ y $c_{a6} (0,219 \pm 0,007)$. Para el rojo se usaron $c_{r1} = (0,005 \pm 0,005)$ y $c_{r2} = (0,016 \pm 0,003)$. En esta configuración, los haces de luz pasaban a través del recipiente, generando patrones de difracción para distintas longitudes de onda respecto al dispositivo sin recipientes. Nuevamente se fotografió el primer orden de difracción en el mismo lugar que en el espectro de calibración, repitiendo el proceso para todas las concentraciones de cada colorante. Estas fotografías fueron analizadas utilizando ImageJ, con el objetivo de observar qué longitudes de onda eran absorbidas por el colorante y en qué medida, y cuáles lograban ~~atravesarlo~~.

3. Resultados

Se caracterizó la linealidad de la cámara para la intensidades a partir de la ley de Malus, dada por la ecuación 1. Los datos se pueden ver en la figura 2, junto con el rango lineal de la cámara. El mismo no está cerca de la intensidad total emitida por la fuente, pero el experimento se realiza alrededor de esas intensidades debido a la dispersión de la luz entre los distintos órdenes de difracción.

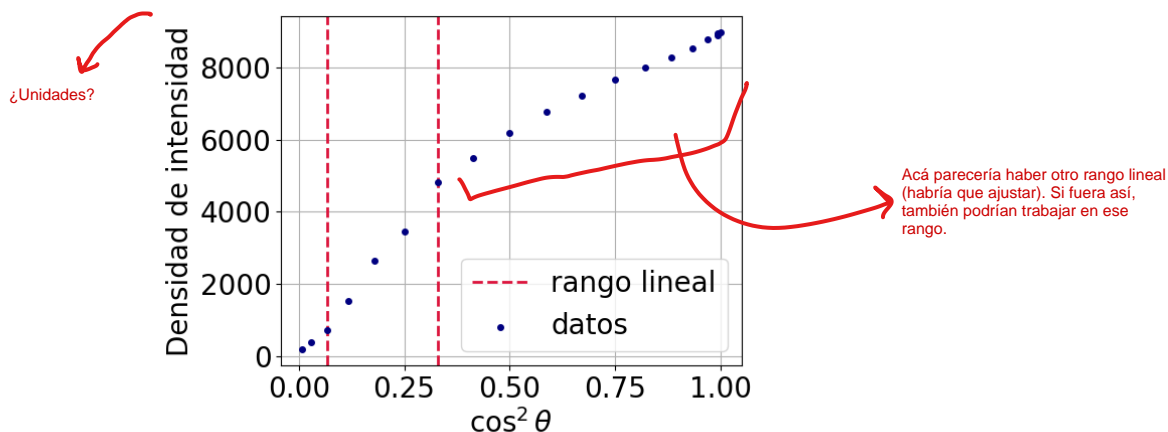


Figura 2: Gráfico de intensidad en función de $\cos^2 \theta$. En líneas punteadas se observa el rango lineal de la cámara

También se analizó la estabilidad temporal de la fuente al medir la señal con un detector a lo largo de 30 segundos, obteniéndose $\sigma = 1 \text{ lx}$. La intensidad promedio en este intervalo de tiempo fue $I_0 = (125 \pm 1) \text{ lx}$.

Luego, se calculó la transformación que debía hacerse de píxeles a longitudes de onda para utilizar el dispositivo experimental como espectrómetro, ajustando linealmente los puntos marcados en la figura 3, donde se pueden ver los espectros medidos por Thor Labs (para distintas longitudes de ondas) y por ImageJ (para distintas posiciones en la imagen). Se conectó el primer punto azul de cada gráfico, el segundo punto azul (que representan los picos) y el punto verde (que representa el valle).

De esta manera, se procedió a utilizar el dispositivo experimental para medir los espectros generados por la luz que no era absorbida por las sustancias (figura 4) que se ponían frente a la rendija. Para la primera sustancia

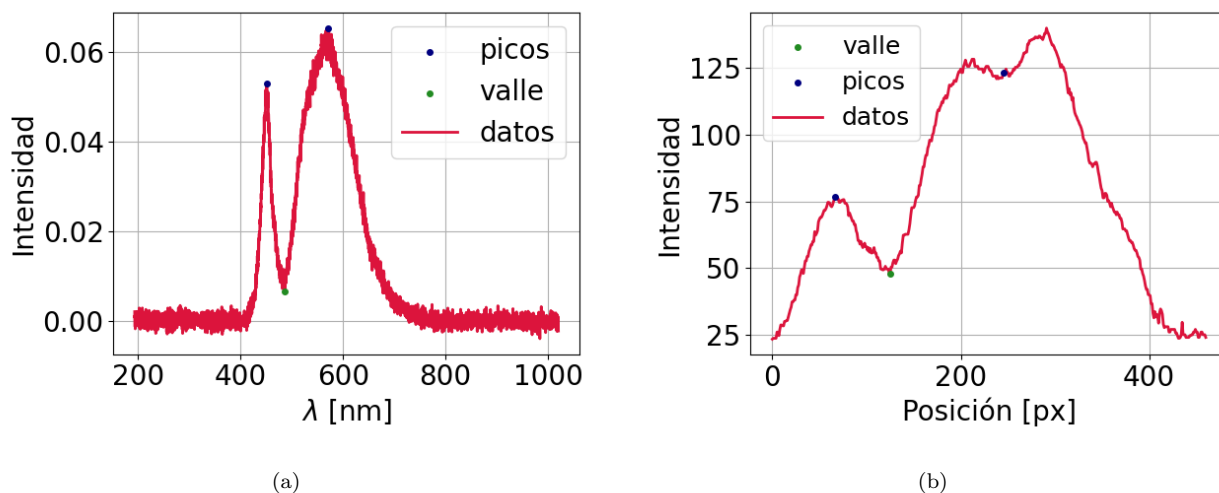


Figura 3: Gráficos de intensidad en función de la longitud de onda (a) y del píxel en la imagen tomada por la cámara (b). Los datos del primero fueron tomados por el espectrómetro directamente desde la fuente utilizando Thor Labs, y los del segundo usando ImageJ luego de que la luz fuese dispersada por el dispositivo experimental. Para la calibración de píxeles a longitudes de onda se conectaron el primer punto azul de cada gráfico, el segundo punto azul y el punto verde.

→ No queda bien que corten un párrafo con las figuras

se ve un comportamiento similar en las longitudes más cortas, con las mayores concentraciones más altas dejando pasar más luz azul. También se ve un valle para todas alrededor de 500 nm, y luego un aumento en intensidad para todas en la luz verde, que se arrastra en diferentes medidas hacia el rojo. Aquí predomina la absorción para mayores concentraciones, mientras que la menor concentración deja pasar mucha más luz en estos colores. Para la segunda sustancia se observan intensidades similares para el azul en ambas concentraciones, pero una gran discrepancia en el verde, con la menor concentración absorbiendo mucho más en este rango. Luego se observan comportamientos casi idénticos para el pico en el rango rojo y el posterior decaimiento para longitudes mayores.

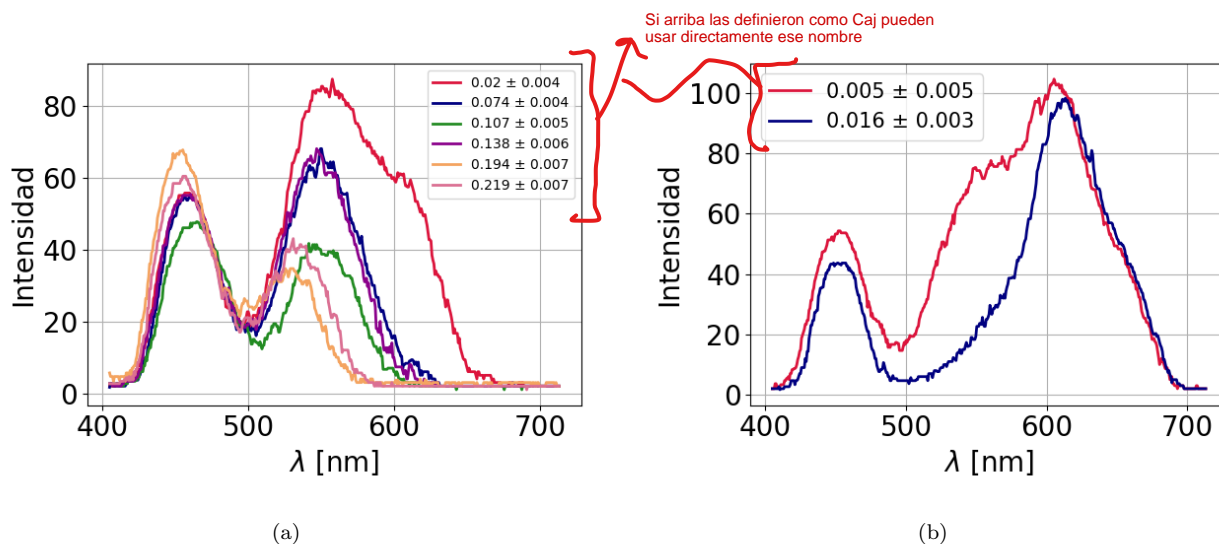
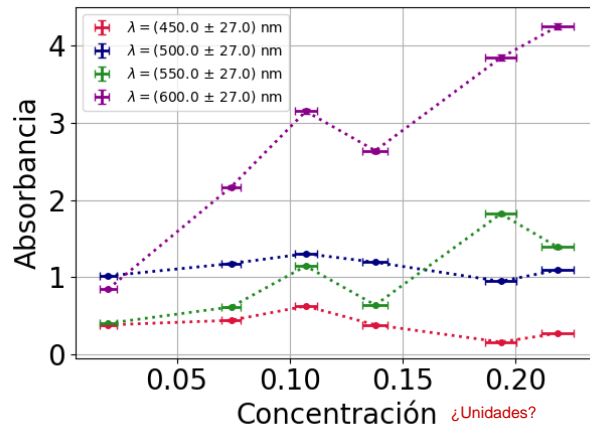


Figura 4: Gráfico de intensidad en función de la longitud de onda para distintas concentraciones de la primera (a) y la segunda (b) sustancias.

Luego, se calculó la absorbancia para distintas longitudes de onda ((450 ± 27) nm, (500 ± 27) nm, (550 ± 27) nm y (600 ± 27) nm.) según la ecuación 2. Los datos en función de la concentración se pueden ver en la figura 5. Según la ley de Beer-Lambert (ecuación 3) esta relación debería ser lineal, pero esto no se cumple, posiblemente debido a contaminación de la sustancia. Se puede apreciar algo más cercano a la teoría para las 2 longitudes más largas, pero no se acerca a la predicción. Para la segunda sustancia solo se pudo medir dos concentraciones distintas, por lo que no se puede analizar con propiedad esta relación.



:(Igual entre la resolución que manejan y que las muestras que usaron ustedes eran las viejas, puede ser que no haya salido.

Figura 5: Gráfico de absorbanza en función de la concentración para distintas longitudes de onda. Las líneas punteadas son de carácter únicamente ilustrativo.

4. Conclusión

En cuanto al dispositivo experimental montado en este trabajo, se puede decir que se logró armar un espectrómetro efectivo, que mide correctamente los rangos de longitudes de onda, con una resolución $R = 27nm$. Esta resolución es inferior a la de un espectrómetro estándar como el de Thor Labs, y demuestra que el espectrómetro no es adecuado para medir longitudes de onda con exactitud al orden de los nanómetros.

Estas limitaciones surgen debido a las características de los instrumentos utilizados. Hay distintas formas para mejorar la resolución, como utilizar una cámara de mejor calidad y con mayor cantidad de píxeles, o una red de difracción con más aberturas.

La experiencia para la cuál se usó el espectrómetro, sin embargo, no resultó como se esperaba. La intención era demostrar la linealidad de la intensidad con la concentración de la muestra que se atravesaba, y a partir de esto calcular el coeficiente de absorción molar. Esto, no resultó posible por problemas relativos al estado de las soluciones.

Referencias

- [1] Oscar E. Martínez. *Ondas: Es Física*. 2008.