

# Configuración de monocromadores para la aplicación en mediciones de óptica cuántica.

John Fredy Suárez Pérez

Departamento de Física, Universidad de los Andes

jf.suarez@uniandes.edu.co

Asesorado por: Mayerlin Nuñez, PhD. y Alejandra Valencia, PhD.

Un monocromador es un dispositivo óptico que permite seleccionar y transmitir luz a una longitud de onda específica tomada de un espectro incidente. Recientemente el laboratorio de óptica cuántica ha adquirido dos monocromadores. En este proyecto se alinearon, calibraron y automatizaron estos dispositivos. Logrando esta configuración, a futuro, se podrán emplear dentro de una gran variedad de aplicaciones en espectroscopia cuántica en los que jugarán un papel indispensable optimizando los procesos experimentales.

## I. OBJETIVOS

- Configurar los monocromadores recientemente obtenidos por la universidad logrando la automatización en el proceso de selección y transmisión de diversas longitudes de onda.

### A. Objetivos Específicos

- Alinear el montaje óptico para acoplar luz en los monocromadores y estudiar la luz de salida de ellos.
- Calibrar los monocromadores de modo que se logre observar el espectro de una fuente de luz conocida.
- Automatizar el mecanismo de funcionamiento de los monocromadores y la adquisición de datos para optimizar los procesos experimentales en los que sean empleados estos dispositivos.

## II. INTRODUCCIÓN

El papel que desempeñan los monocromadores en experimentos de espectroscopia cuántica es de suma importancia pues facilitan el análisis del espectro de frecuencias de diferentes fuentes de luz, específicamente, permiten realizar barridos en amplios intervalos de longitud de onda permitiendo conocer el espectro característico de la fuente.

Recientemente el laboratorio de óptica cuántica ha adquirido dos monocromadores (MC) 9072 ScienceTech<sup>®</sup> [1] (figura 1). Cada monocromador tiene dos rejillas de difracción, una centrada en @400nm con un intervalo entre 100nm y 600nm. La otra rejilla se encuentra centrada en @800nm con un rango entre 600nm y 1300nm, en general este monocromador permite hacer barridos de longitud de onda entre 100nm y 1300nm. Para seleccionar una longitud de onda se hace girar un motor en el que se encuentran adheridas las rejillas, de esta forma indicando una posición para el motor se fija una longitud de onda. Los monocromadores se componen de dos rendijas, una para la entrada de luz y

otra para la salida cuyo tamaño puede ser configurado.

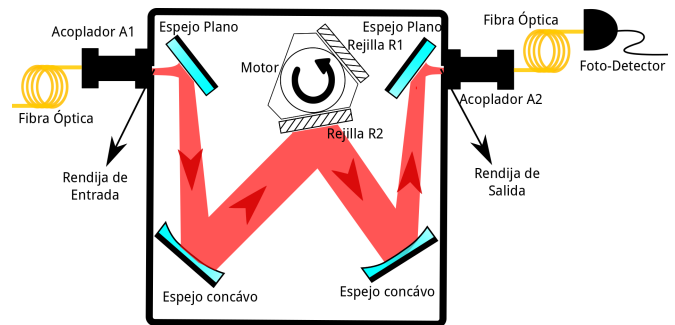


Figura 1. Esquema y funcionamiento del monocromador 9072 ScienceTech<sup>®</sup>.

Esta luz es reflejada por un espejo plano sobre la superficie de un espejo cóncavo, el espejo recibe la luz y la colima haciéndola incidir sobre toda el área de la rejilla de difracción, que se encarga de separar el espectro de la fuente. El espectro producido por la rejilla es reflejado en diferentes direcciones dependiendo de la longitud de onda, esta luz es de nuevo reflejada sobre un espejo que se encarga de enfocar de nuevo la luz para sacarla a través de la rendija de salida como se ve en la figura (1).

En este proyecto se alinearon fuentes de luz de dos tipos: luz láser Helio-Neón (HeNe) y luz de una lámpara de mercurio (Hg) acopladas a cada MC. Se calibraron los MC con estas fuentes de luz para determinar la resolución y precisión de los dispositivos midiendo los espectros característicos de estas fuentes con un foto-detector adaptado a un sistema de adquisición de datos basado en el microprocesador Arduino<sup>®</sup>.

Para calibrar los monocromadores se empleó el montaje experimental de la figura (2). La luz de la fuente es acoplada en una fibra óptica que se conectada a un acoplador encargado de introducir la luz a los monocromadores, al cambiar la orientación de las rejillas que se encuentran al interior del monocromador se puede obtener el espectro de la luz incidente, que sale a través de otra fibra óptica dirigida a un foto-detector. También se midió el espectro de una lámpara de mercurio, estas

mediciones fue comparadas con la obtenida por un espectrómetro y lo encontrado en la literatura.

Finalmente, se diseñó una aplicación que permite el control de la posición de las rejillas que se encuentran dentro del monocromador, permitiendo realizar barridos del parámetro longitud de onda.

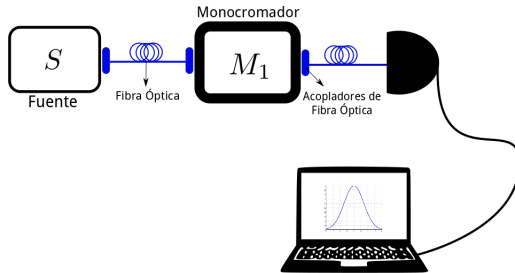


Figura 2. Esquema del montaje experimental.

### III. METODOLOGÍA

#### A. Alineación

Inicialmente se acopló la luz del láser HeNe al monocromador mediante una fibra óptica, logrando que el foco de la luz se ubicará justamente en la rendija de entrada de modo que al salir del monocromador lo haga igualmente enfocada y así visualizar una señal de salida que es medida con un foto-diodo.

Se estudiaron varias configuraciones para acoplar la máxima cantidad de luz en el monocromador debido a que las lentes (con 50mm de distancia focal DF) que venían instaladas en los acopladores del monocromador no eran las que permitían obtener un acople óptimo dado que se perdía una gran cantidad de luz. Tras varias pruebas, el arreglo óptico de la figura (3) fue el más óptimo. Esta configuración permitió acoplar una alta cantidad de luz dado que al salir de la fibra diverge rápidamente, por lo que es necesario capturarla con una lente de distancia focal pequeña (se usó una de 11mm DF) para ser colimada, de lo contrario gran parte de la luz se perderá en las paredes del acoplador. Luego de ser colimada se enfoca con una lente de 80mm DF de modo que el foco se ubique justamente en la rendija de entrada del monocromador. Al enfocar la luz en este punto, el arreglo óptico contenido dentro del monocromador ilumina la rejilla que difracta la luz incidente (dividiendo la luz en franjas que muestran su espectro). El monocromador está diseñado de tal forma que la luz salga enfocada justo donde se ubica la rendija de salida (figura 1), de nuevo se colima con una lente de 80mm DF y se enfoca nuevamente con una de 11mm DF para acoplarla en una fibra óptica. La luz que sale al otro

lado de la fibra se apunta a un fotodiodo, de esta forma se midió la intensidad de salida. Es válido resaltar que el sistema de medición basado en un foto-detector tubo que ser mejorado (incrementando la resistencia interna del circuito a un valor alrededor de 200  $M\Omega$ ) para tener la capacidad de medir señales débiles.

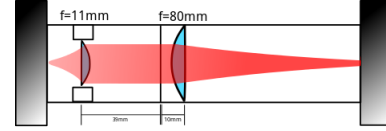


Figura 3. Arreglo óptico del acoplador de luz.

Las señales captadas por el foto-detector son enviadas a un microprocesador que genera un archivo con los valores de tiempo e intensidad. Cuando se activa el barrido del monocromador la aplicación toma 100 datos por cada posición de la rejilla. Finalmente, los valores de voltaje son promediados y graficados como función de la longitud de onda, obteniendo así el espectro de longitudes de onda.

#### B. Calibración

Como método de calibración se comparó el espectro del láser HeNe medido con los MC con el medido por el espectrómetro HR4000CG-UV-NIR de Ocean Optics® [2]. De igual forma se midió el espectro de frecuencias de una lámpara de mercurio (Hg) con los monocromadores, y se comparó igualmente con el obtenido mediante el espectrómetro [2].

Las medidas realizadas se hicieron con las rendijas en su mínimo tamaño (Tabla I) garantizando no obtener una difracción como consecuencia del tamaño de las aperturas de la rendija. Bajo esta premisa se evidencia una relación entre el tamaño de las aperturas y el ancho de los picos en las distribuciones.

#### C. Automatización

Con la automatización se buscan realizar medidas simultáneas con dos monocromadores mediante un aplicación diseñada en LabView®. Hasta el momento se diseñó un programa que permite controlar la orientación de las rejillas de cada MC ingresando como parámetro la longitud de onda requerida. Se puede fijar una posición o determinar un intervalo de longitud de onda, indicando los saltos en posición y tiempo de exposición para cada paso como se puede ver en la figura (4).

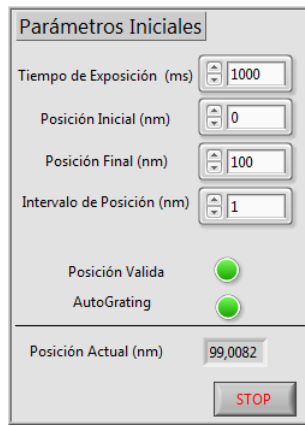


Figura 4. Interfaz gráfica del software diseñado en LabView.

## IV. ANÁLISIS DE DATOS

### A. Calibración con el Láser HeNe

La figura (5) muestra el espectro de longitud de onda del láser HeNe medido con el espectrómetro. Mediante un fiteo gaussiano se obtuvo una longitud de onda centrada en  $633.5\text{nm} \pm 0.001$  con un valor  $\sigma$  igual a  $0.33\text{nm} \pm 0.001$ .

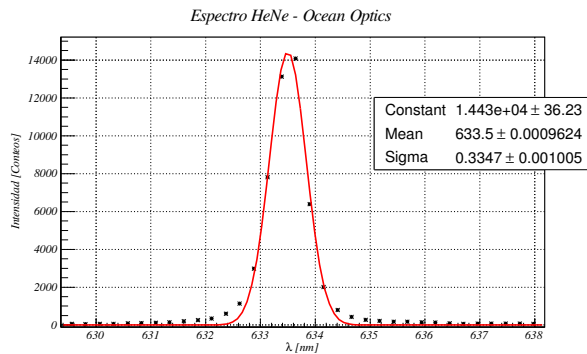


Figura 5. Espectro del láser HeNe obtenido con el espectrómetro OO.

Los espectros medidos para el láser HeNe mediante los monocromadores (MC) arrojaron los resultados presentados en las gráficas 6 y 7, la figura 6 muestra el espectro obtenido con el MC1, en este caso se obtuvo una longitud de onda de  $630 \pm 0.004$  nm y un  $\sigma$  de  $1.11 \pm 0.005$ . En la gráfica 7 para el MC2 se obtuvo una longitud de onda de  $634.2 \pm 0.003$  nm y un  $\sigma$  de  $0.62 \pm 0.004$ . Estos valores fueron obtenidos con el mínimo tamaño de la rejilla antes del límite de difracción. Los tamaños de la rendija y los valores medidos para la longitud de onda y el ancho  $\sigma$  son relacionados en la tabla (I). La incertidumbre en los valores de longitud de onda representan la resolución de cada monocromador, es decir, el mínimo cambio en longitud de onda que puede ser detectado.

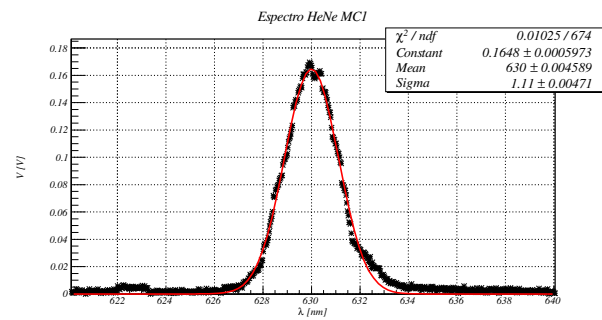


Figura 6. Espectro del láser HeNe obtenido con el Monocromador 1.

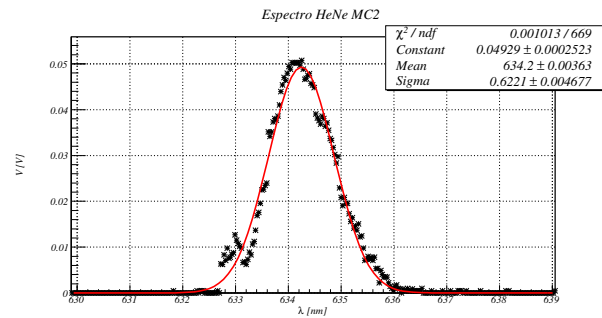


Figura 7. Espectro del láser HeNe obtenido con el Monocromador 2.

Se tomaron medidas con rendijas de tamaños mayores obteniendo en el espectro picos demasiado anchos, es decir, con  $\sigma$  grandes del orden de varios nm. Para las mediciones con tamaños mas pequeños se obtuvo más de un pico lo que refleja efectos de difracción. Se concluye que el tamaño de la rendija influye en la medida del espectro pues permite cambiar el ancho  $\sigma$  y la amplitud del pico. El valor de  $\sigma$  nos indica la resolución del instrumento de medición, para el caso de los MC esta cantidad se relaciona con el tamaño de las rendijas, dada esta relación se evidencia que en la gráfica (7) el valor de  $\sigma$  es menor que el caso de la figura (6) puesto que el tamaño de la rendija de salida es mucho menor en el

|               | Ancho Entrada [mm] | Alto Entrada [mm] | Ancho Salida [mm] | Alto Salida [mm] | $\lambda$ [nm]    | $\sigma$ [nm]    |
|---------------|--------------------|-------------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|
| Espectrómetro | X                  | X                 | X                 | X                | $633.5 \pm 0.001$ | $0.33 \pm 0.001$ |
| MC1           | $0.18 \pm 0.01$    | $2 \pm 0.1$       | $0.20 \pm 0.01$   | $3 \pm 0.1$      | $630 \pm 0.004$   | $1.11 \pm 0.005$ |
| MC2           | $0.17 \pm 0.01$    | $2 \pm 0.1$       | $0.12 \pm 0.01$   | $3 \pm 0.1$      | $634.2 \pm 0.004$ | $0.62 \pm 0.004$ |

Tabla I. Tabla de relación entre el espectro medido por el espectrometro y los monocromadores.

MC2 que en el MC1.

De acuerdo a los datos de la tabla (I) se encuentra con los MC para la longitud de onda del HeNe un corrimiento respecto al valor medido por el espectrómetro. Para el MC1 se encontró un corrimiento de 3nm y para el MC2 4.2 nm, estos errores indican que los MC no se encuentran calibrados y estas cantidades deben ser considerados para futuros proyectos.

## B. Calibración con la lámpara de Hg

Por otro lado se midió con el espectrómetro la luz proveniente de la lámpara de mercurio y se obtuvieron los resultados de la figura 9.

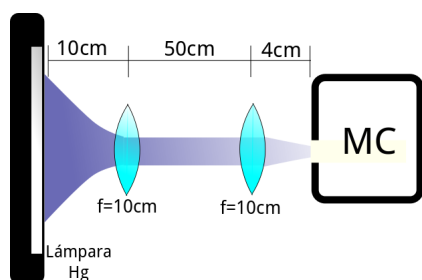


Figura 8. Montaje diseñado para la lámpara de Hg.

Con el montaje de la figura (8) se logran identificar picos característicos del mercurio donde el más alto corresponde a la longitud de onda del verde. El tamaño de la apertura de entrada fue de 9mm de alto por 0.57 mm de ancho y para la apertura de salida fue de 7mm de alto por 0.20 de salida.

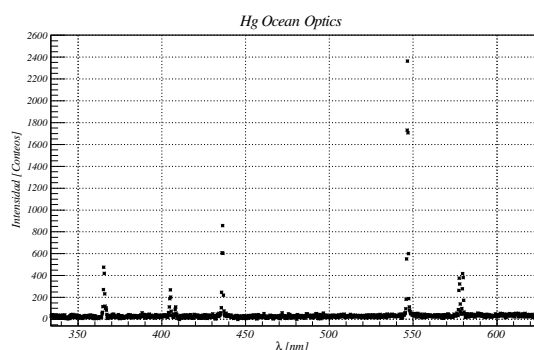


Figura 9. Espectro de la lámpara de Mercurio medido con el espectrómetro.

En las figuras 10 y 11 se visualizan 5 picos característicos del espectro del mercurio.

En la tabla II se comparan los resultados obtenidos con el espectrómetro, los medidos con los monocromadores

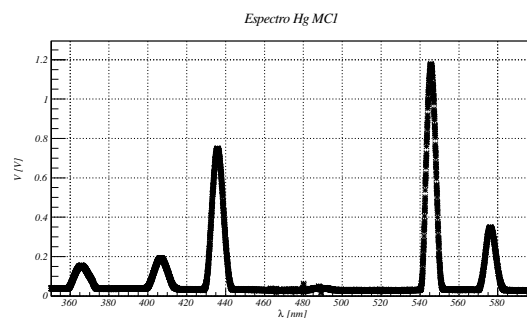


Figura 10. Espectro de la lámpara de mercurio medido con el monocromador 1.

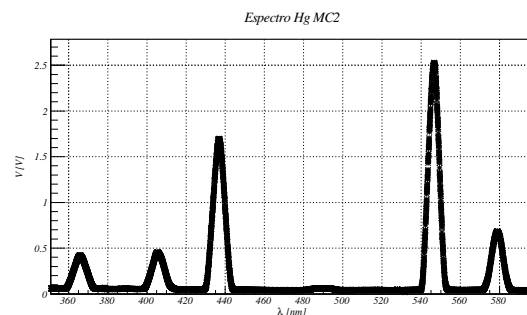


Figura 11. Espectro de la lámpara de mercurio medido con el monocromador 2.

y se comparan mediante un error porcentual con los encontrados en la literatura.

Los errores porcentuales son los indicados en la tabla (II) comparados con los reportados por NIST[3]. El más alto es de 4.83% para el monocromador 2 y 2.34% para el monocromador 1. Para cada uno de los picos del espectro medido se realizó un ajuste gaussiano para determinar el ancho correspondiente, para ambos casos se obtuvo un valor de 3.1nm. Se busca mejorar la resolución disminuyendo el tamaño de la apertura de los monocromadores pero el foto-detector no era lo suficientemente eficiente y la señal medida se perdía con el ruido del ambiente.

| NIST[nm] | OO[nm] | E%   | MC1[nm] | E%   | MC2[nm] | E%   |
|----------|--------|------|---------|------|---------|------|
| 365.5    | 365.4  | 0.02 | 366     | 0.13 | 366     | 0.13 |
| 407.7    | 405.0  | 0.66 | 416     | 2.03 | 416     | 2.03 |
| 435.8    | 436.2  | 0.09 | 446     | 2.34 | 456     | 4.83 |
| 546.1    | 546.6  | 0.09 | 546     | 0.01 | 546     | 0.01 |
| 576.9    | 578.7  | 0.31 | 581     | 0.71 | 576     | 0.15 |

Tabla II. Comparación de valores teóricos y experimentales de los picos característicos de la lámpara de mercurio [3].

## V. CONCLUSIONES

Es recomendable usar en los acopladores de fibra del monocromador el montaje óptico propuesto a diferencia del que traían por defecto, dado que se optimiza el proceso de acople impidiendo la pérdida de intensidad del haz láser.

Se midió el espectro del láser HeNe obteniendo valores de 633nm con errores de 0.47% para el MC1 y 0.15% para el MC2, este corrimiento nos indica que los MC no se encuentran calibrados.

Los espectros medidos para el Hg eran los esperados de acuerdo a lo consultado en la literatura y el medido con el espectrómetro, los errores porcentuales estimados se presentan en la tabla (I). Estos errores se pueden atribuir al tamaño de las aperturas pues se evidenció que existe un límite mínimo, empleado en esta medición. Por debajo de ese tamaño el sistema de detección nos limita la medición de señales débiles que son fácilmente confundibles con el ruido del ambiente, para futuros

experimentos podemos usar detectores de fotones individuales (Single Photon Counters - SPC). Si el tamaño de la rendija es mayor se pierde resolución obteniendo incertidumbres más grandes a las expuestas. Por otro lado, es importante resaltar que los corrimientos encontrados para los monocromadores de 3nm para el MC1 y 4.2nm para el MC2 deben ser considerados para futuros proyectos en los que sean empleados.

Se tienen problemas en automatizar el funcionamiento de los dos monocromadores en simultáneo pues cada monocromador requiere de un computador para su funcionamiento. Una posible solución consiste en usar un microordenador Raspberry Pi con Windows 10<sup>®</sup> que sea controlado desde el equipo principal a través de una conexión de red. También se requiere que la aplicación desarrollada sea integrada al sistema de medición del fotodiodo de modo que los datos tomados por el sistema de adquisición incluyan el valor de la longitud de onda. En estos momentos se está trabajando para alcanzar este objetivo.

- 
- [1] ScienTech. 9072 computer controlled monochromator-spectrograph.
- [2] Ocean Optics. Espectrometro hr4000cg-uv-nir de ocean optics. <http://oceanoptics.com/product/hr4000cg-uv-nir/>.
- [3] A. Kramida, Yu. Ralchenko, J. Reader, and NIST ASD Team. NIST Atomic Spectra Database (ver. 5.3), [Online]. Available: <http://physics.nist.gov/asd> [2016, February 28]. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD., 2015.

---

Mayerlin Nuñez Portela, PhD.  
Asesora

---

Alejandra Catalina Valencia, PhD.  
Asesora