

Caracterización filtro Monocromador LEOI-92

Martha Ines Ortiz y María Cristina Navarrete

El monocromador es un instrumento usado en óptica para control de radiación electromagnética, por esta razón es de importancia conocer las especificaciones en la práctica de este instrumento. En este documento se presenta el procedimiento llevado a cabo para la caracterización de este filtro óptico. Para encontrar el rango de operación, eficiencia y resolución del monocromador, se reconstruyó de manera discreta el espectro de algunos LEDs con diferentes rangos de emisión, utilizando como referencia los espectros respectivos a cada LED obtenidos experimentalmente con un espectrómetro. Del análisis se encontró que el rango de operación del monocromador funciona para longitudes de onda mayores a 800 nanómetros; es decir el rango que cubre en infrarrojo es mayor al especificado por el fabricante.

Palabras clave: Monocromador, espectro, caracterización, LED, espectrómetro.

1. Introducción

Al realizar estudios de investigación, es importante conocer las especificaciones de los instrumentos de medición con el fin de reducir la incertidumbre al obtener datos experimentales. Específicamente, en investigación en óptica cuántica es necesario conocer las características de filtros que controlen la radiación electromagnética para un estudio detallado sobre una muestra específica o sobre la misma radiación. Por esta razón realizar la caracterización de un tipo de filtro, filtro monocromador, es un paso necesario en estudios de investigación óptica.

Este proyecto se realizó para ayudar a estudiantes de Maestría y Doctorado pertenecientes al grupo de óptica cuántica de la universidad a mejorar la incertidumbre en las mediciones de su proyecto de investigación. Su trabajo consiste en la detección de coincidencias entre pares de fotones, el rayo inicial es emitido por un láser infrarrojo esencialmente a 810 nm y necesitan filtros ópticos para que la emisión sea más exacta en longitud de onda; en ese sentido filtros con mejor resolución o menor ancho de banda son de preferencia en su investigación. El monocromador según las especificaciones de fabricante es un filtro de opera entre 200 y 800 nm y su resolución puede ser de 1.5nm o de 3nm, lo cual hace al monocromador una herramienta útil para controlar la radiación. El problema de usar dicho filtro es que no opera en la longitud de onda que se usa en el proyecto de investigación mencionado anteriormente. El objetivo general de este proyecto es caracterizar el monocromador LEOI-92 de Lambda Scientific Systems, es decir encontrar tres parámetros importantes en su funcionamiento. El primero de ellos es el rango de longitudes de onda en el que opera y compararlo con el expuesto por el fabricante, para ello se analizan los espectros de diferentes fuentes de radiación, LED's, en el espectro visible e infrarrojo cercano. La segunda característica para tener en cuenta es la eficiencia del instrumento, fundamental si se requiere trabajar específicamente con la energía del haz de luz, esta se puede obtener con dispositivos de medición de potencia óptica. Finalmente se quiere conocer la resolución

del instrumento dado que de esta característica depende la capacidad de controlar la radiación incidente en cualquier sistema. A continuación, se mostrarán los procedimientos, cálculos y en general el análisis llevado a cabo para encontrar dichos parámetros y compararlos con las especificaciones del fabricante.

2. Marco Teórico

Los espectrómetros ópticos consisten en instrumentos que recogen y dispersan radiación electromagnética para crear una señal óptica y monocromática en la salida. El monocromador, como un tipo de espectrómetro, consiste en un instrumento capaz de aislar una región del espectro de una fuente de radiación electromagnética incidente para obtener una señal monocromática de interés. Mide la distribución de radiación de la fuente en una región de energía particular. Dentro de las aplicaciones de este instrumento se encuentran principalmente dos: como filtro, para irradiar una muestra con una energía específica, o para analizar el espectro de cualquier fuente y con ello determinar su composición.

Dentro del mecanismo básico interno de un monocromador típico, la luz de la fuente incide a través de una pequeña abertura de alrededor de 3.0 mm, para dirigir la luz al interior del instrumento, en la entrada se encuentra un espejo reflector, siendo este el primer espejo en el que incide la luz. El segundo de ellos es un colimador esférico; a partir de un haz divergente, se obtiene un haz paralelo. La salida de este espejo, pasa a una rejilla que abre el espectro de la fuente de la misma forma como lo realiza un prisma y finalmente, luego de reflejarse en dos espejos más, el primero de nuevo colimador esférico y el segundo para redireccionar hacia la salida; se obtiene en la salida la longitud de onda de interés que estará determinada por la rotación de la rejilla operado por medio de un tornillo micrométrico al exterior del monocromador. El rango en el que alcanza a rotar la rejilla es de 0 ° a hasta 40°. El espectro se refleja por completo en el plano de salida

del monocromador, gracias al desplazamiento del tornillo micrométrico de tal manera que justo en la abertura de salida, se encuentre la longitud de onda requerida; el rango en el que se percibe la rotación de la rejilla de difracción es entre 0.66 mm y 10.5 mm.[1] Esquemáticamente, la figura 1 muestra el sistema óptico al interior del monocromador LEOI-92:

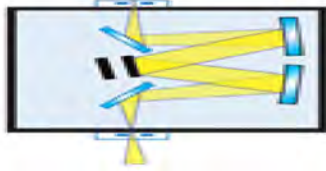


Fig 1. Diseño óptico del monocromador [1]

Por otro lado, los espectrómetros, con un mecanismo similar interno como se muestra en la figura 2, poseen en lugar de una abertura estrecha en la salida, una lámina plana en donde es proyectado el espectro; de esta manera, un rango más amplio del espectro puede ser analizado en simultáneo, en general, entre 10 nm y 100 nm.

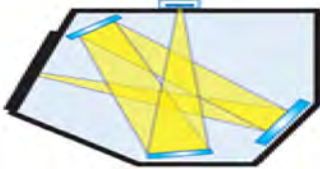


Fig 2. Diseño óptico del espectrómetro [1]

Los fotodiodos son dispositivos semiconductores basados en el principio del efecto fotoeléctrico

3. Marco experimental

Durante la práctica, se llevaron a cabo una serie de montajes con los cuales fue posible realizar la medición de los espectros de los diferentes LEDs con los que se podría caracterizar el monocromador. Las bases de los montajes están estrechamente relacionadas dado que el principio de medición, tanto en el espectrómetro como en el monocromador, es el mismo.

3.1. Montajes con monocromador

Para detallar la obtención de espectros electromagnéticos a partir del monocromador LEOI-02, los montajes realizados se describen a continuación.

3.1.1. LEDs

En la figura 3 se muestra el montaje general utilizado para cada uno de los LEDs.

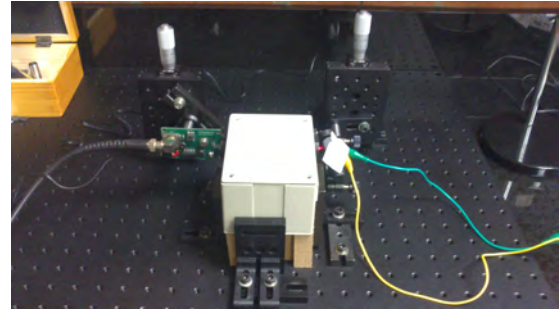


Fig 3. Montaje básico utilizado para cada uno de los LEDs

El montaje cuenta principalmente con siete instrumentos y sub-montajes principales. Tres de estos consisten en el montaje de la entrada del monocromador. En primer lugar, en la figura 4 se muestra la fuente que emite sobre el monocromador, LED, cuyo espectro será analizado.

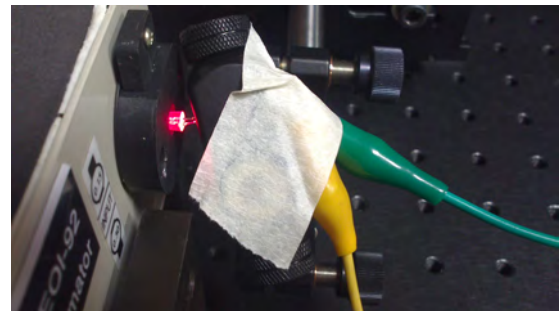


Fig 4. Luz desde LED hacia la entrada del monocromador.

Las figuras 5 y 6 hacen referencia a un sub-montaje para el LED. La figura 5 muestra el circuito empleado para encender el bombillo que consta de una resistencia en serie con el LED en cuestión y con la fuente de voltaje mostrada en la figura 6; una fuente de 1 V.

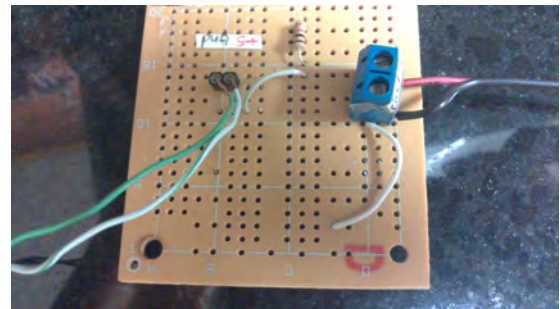


Fig 5. Circuito para cada LED.



Fig 6. Fuente de alimentación para el LED.

Por otro lado, se tiene el monocromador LEOI-92 con el que se obtendría el espectro del LED cuya luz incide sobre él. En la figura 7 se muestra la estructura interna del

monocromador, cuyo diseño coincide con el especificado en el marco teórico:



Fig 7. Interior del monocromador LEOI-92.

La fuente se encuentra en la parte inferior del monocromador ilustrado, y la salida en la parte superior. En el costado derecho, fuera del monocromador se encuentra el tornillo micrométrico. En el interior del instrumento se encuentran en el costado izquierdo los espejos colimadores y al costado derecho, en el centro, la rejilla encargada de abrir el espectro de la fuente.

Las dos siguientes partes del montaje corresponden al sub-montaje para el fotodiodo y al osciloscopio, respectivamente, que ubicados a la salida del monocromador, permiten llevar a cabo el análisis de cada espectro. En la figura 8 se ilustra el circuito correspondiente al fotodiodo con el que se detectará la señal cualitativa y cuantitativa de salida del monocromador.



Fig 8. Circuito para el fotodiodo.

Básicamente, el circuito consiste en un fotodiodo, un amplificador operacional, un transformador y un transistor. Acoplado a este, para cuantificar la salida del monocromador, se encuentra un osciloscopio que permitiría medir y analizar dicha señal para obtener el espectro de la fuente. El osciloscopio utilizado se muestra en la figura 9 a continuación:

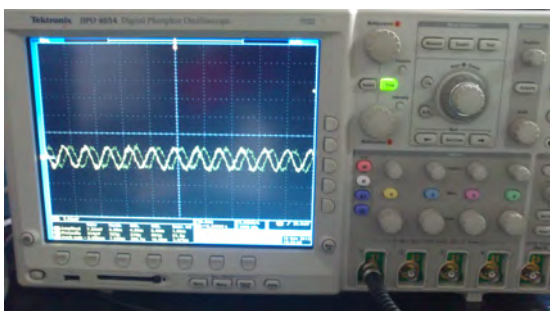


Fig 9. Osciloscopio empleado para medir la señal de salida del monocromador.

Finalmente, para registrar los datos, en el montaje se empleó un computador con un programa instalado especialmente para construir el espectro. La interfaz del programa utilizado se ilustra en la figura 10.



Fig 10. Interfaz del programa utilizado para construir el espectro.

Allí, los dos enormes gráficos presentes corresponden respectivamente de derecha a izquierda, al cambio del voltaje con el tiempo capturado directamente del osciloscopio y al espectro cuya construcción se está llevando a cabo. Los dos botones ubicados en la parte inferior de la interfaz permiten activar el registro de la señal en el osciloscopio o detener el programa.

3.1.2. Láser

Para medir el espectro de un láser de 808 nm, se empleó un montaje muy similar a la entrada e idéntico a la salida del monocromador. Se resaltaré el montaje empleado a la entrada del monocromador que se ilustra en la figura 11:

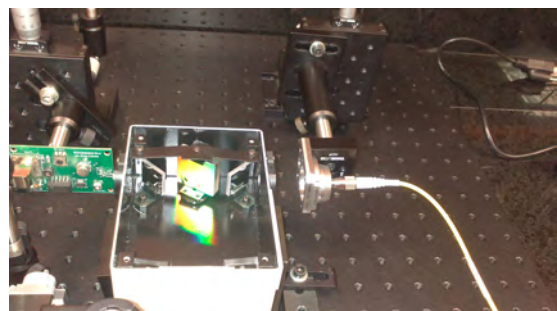


Fig 11. Montaje empleado para incidir luz de un láser de 808 nm sobre el monocromador.

La diferencia se encuentra en que se incidió el láser de manera indirecta sobre el monocromador por medio de

una fibra óptica, haciendo uso de un montaje previamente hecho, ilustrado en la figura 12, en el que se enfoca la luz del láser en la fibra de manera completamente ortogonal por medio de espejos y rendijas.

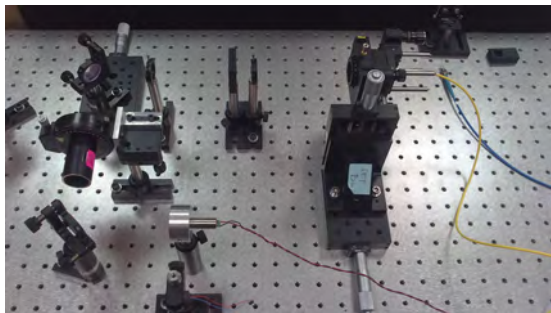


Fig 12. Montaje empleado para enfocar la luz proveniente del láser de 808 nm.

3.1.3. Lámpara de Hidrógeno

Análogamente, la única variante en este caso fue la fuente incidente sobre el monocromador que en este caso consiste en una lámpara de hidrógeno como la que se muestra en la figura 13:



Fig 13. Lámpara de hidrógeno.

Lo importante allí fue la manera como se obstruía el paso de luz que no entraba en la abertura de entrada del monocromador para que no se viera afectada, de manera significativa, el reporte dado por el fotodiodo.

3.2. Montajes con espectrómetro

Por el contrario, la variante en este montaje consiste básicamente en el instrumento con el que se captura una región del espectro de la fuente para reportar un espectro; en lugar de utilizarse un monocromador, se emplea el uso de un espectrómetro. En consecuencia, aquí ya no es necesario el uso de osciloscopio y del fotodiodo.

4. Resultados

4.1. Espectro LEDs con el espectrómetro

Para obtener las gráficas de los espectros experimentales de cada LED se usó el espectrómetro del observatorio astronómico de la Universidad de los Andes en colaboración del profesor Benjamin Oostra. Para calibrar el espectrómetro se usó como fuente una lámpara de hidrógeno dado que la emisión es discreta y permite realizar un análisis

acertado. El análisis de los datos se realizó con herramientas computacionales tales como CCDOpps e Iris. Para la calibración del espectrómetro se tuvo en cuenta que: El espectro de emisión del hidrógeno emite líneas discretas a 656.3 nm(rojo), 486.1 nm(verde), 434.1 nm(azul), 410.2 nm(violeta). A continuación se muestra el espectro obtenido con el espectrómetro y el perfil horizontal en píxeles.

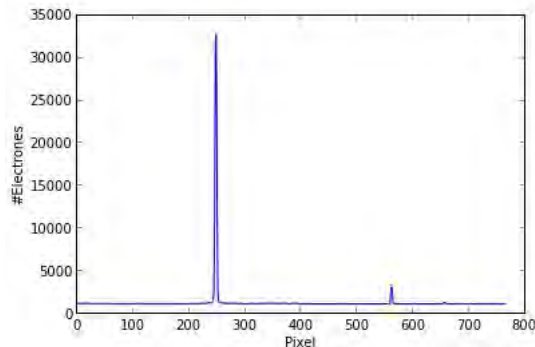


Fig 15. Espectro en píxeles.

Como se dijo anteriormente dado que la emisión del hidrógeno es discreta se extrae de los datos, obtenidos con la cámara, los valores de los píxeles donde se ve un máximo y se realiza una regresión lineal.

Lambda[nm]	Pixel
656.3	248
486.1	561.4
434.1	656.2
410.2	700
4.56	449.53

A partir de este análisis se obtiene la siguiente relación de transformación de píxeles a longitudes de onda. Sea 'y' longitudes de onda en nanómetros y 'x' píxeles.

$$y = -0,5443x + 791,3866 \quad rvalue = 0,999998$$

con dicha relación ya se puede encontrar el espectro en longitudes de onda de todos los LEDs, los resultados se pueden observar en las siguientes secciones.

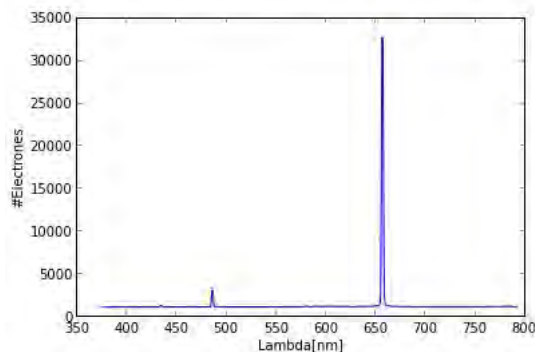


Fig 16. Lámpara de Hidrógeno.

4.1.1. LED rojo

El rango en el espectro visible para el color rojo se encuentra entre 620 nm y 750 nm[2]. Con el espectrómetro

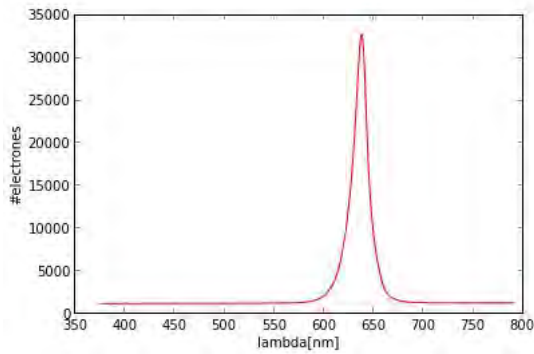


Fig 17. LED rojo.

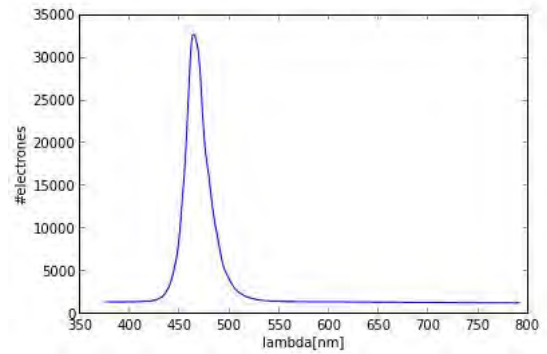


Fig 20. LED azul.

4.1.2. LED verde

El rango en el espectro visible para el color verde se encuentra entre 495 nm y 750 nm[2]. Con el espectrómetro

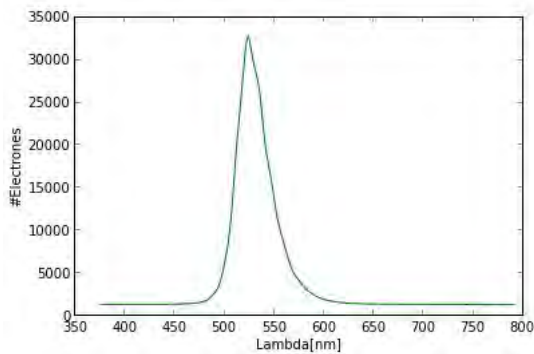


Fig 18. LED verde.

4.1.5. LED violeta

El rango en el espectro visible para el color verde se encuentra entre 380 nm y 450 nm[2].

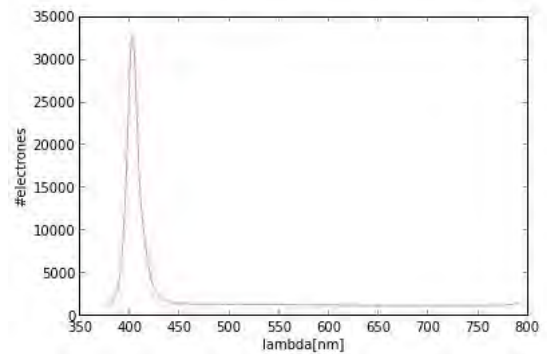


Fig 21. LED violeta.

4.1.3. LED amarillo

El rango en el espectro visible para el color verde se encuentra entre 570 nm y 590 nm[2].

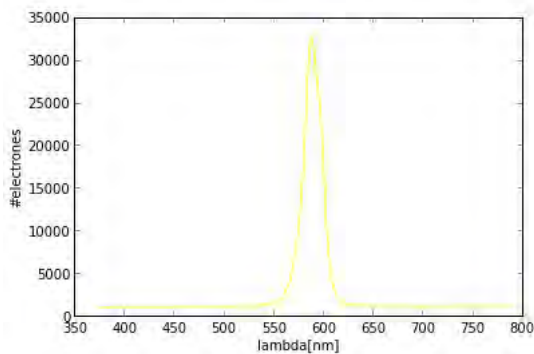


Fig 19. LED amarillo.

4.1.6. LED blanco

El color blanco se conoce que es la suma de todas las posibles longitudes de onda del espectro. En ingeniería, la construcción de un led que emita color blanco varía como se muestra en la siguiente figura:

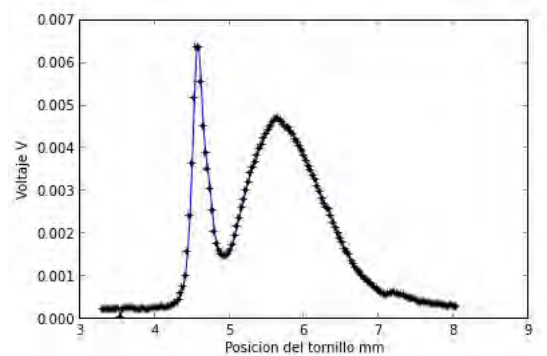


Fig 22. LED blanco.

4.1.4. LED azul

El rango en el espectro visible para el color verde se encuentra entre 450 nm y 495 nm[2].

4.1.7. LED infrarrojo cercano

Este LED es perceptible al detector humano, se alcanza a ver una luz roja tenue. Su espectro se muestra en la

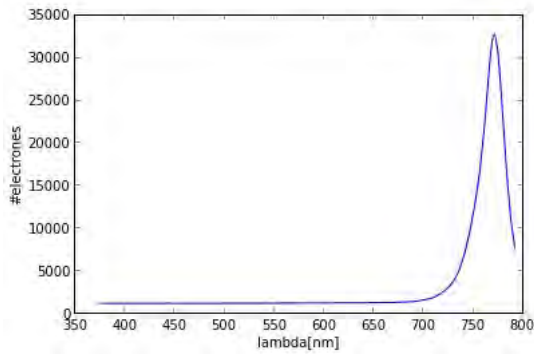


Fig 23. LED Inf. cercano.

4.1.8. LED 810 nm

Este LED era el mas relevante para el analisis dado que a esa longitud de onda trabajan en el grupo de óptica cuántica.

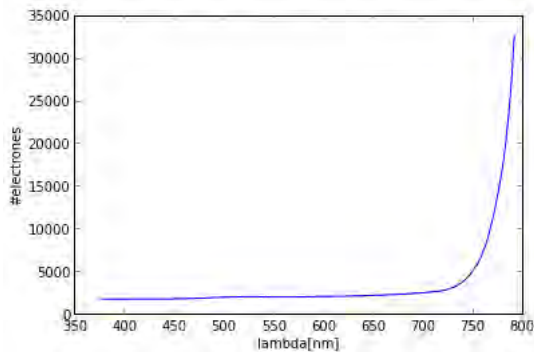


Fig 24. LED Inf. 810 nm.

4.1.9. LED Infrarrojo

Este LED no pudo ser detectado completamente por el espectrometro. Su espectro es:

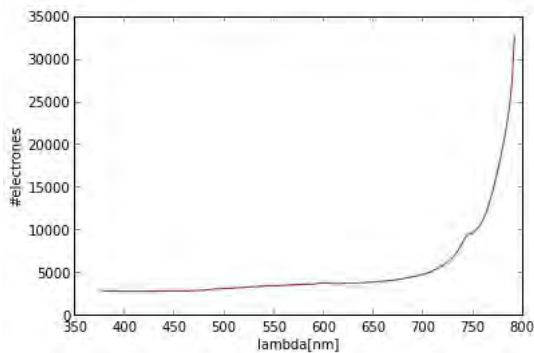


Fig 25. LED Infrarrojo.

4.2. Espectro LEDs en monocromador

En esta parte del experimento se realizaron mediciones con el monocromador. Mediante corrimientos constantes al tornillo micrométrico era posible reconstruir el espectro del LED. Para cada LED se buscaba el punto mas cercano a cero donde no se dectara señal en el osciloscopio y se asignaba como punto inicial, de igual forma con el punto mas alejado del cero determinado como punto final.

Para ejecutar el programa de tratamiento de datos era necesario tener determinado el numero de puntos iban a tomar.

4.2.1. LED rojo

Punto mínimo: 4.70mm
 Punto máximo: 6.72mm
 Número de puntos: 30
 Δ tornillo: 0.06 mm

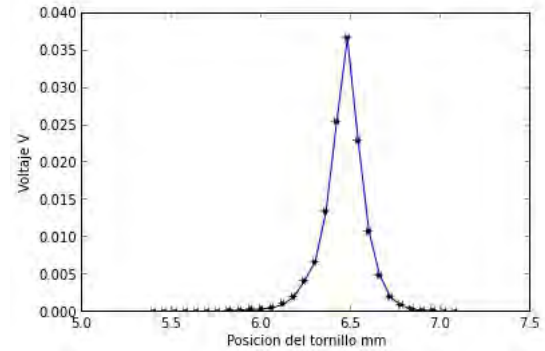


Fig 26. Rojo.

4.2.2. LED verde

Punto mínimo: 4.70mm
 Punto máximo: 6.72mm
 Número de puntos: 20
 Δ tornillo: 0.1mm

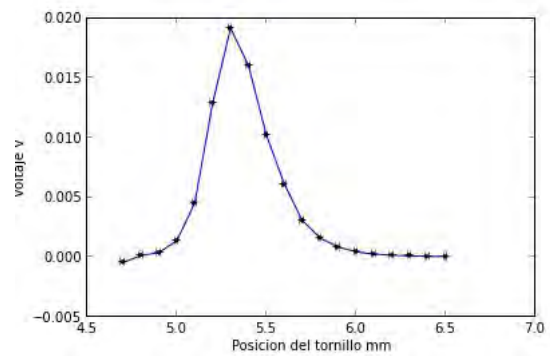


Fig 27. Verde.

4.2.3. LED amarillo

Punto mínimo: 5.20mm
 Punto máximo: 6.55mm
 Número de puntos: 27
 Δ tornillo: 0.05mm

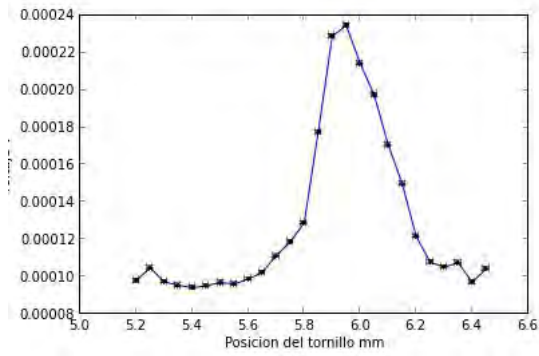


Fig 28. Amarillo.

4.2.4. LED azul

Punto mínimo: 3.95mm
 Punto máximo: 5.95mm
 Número de puntos: 50
 Δ tornillo: 0.05

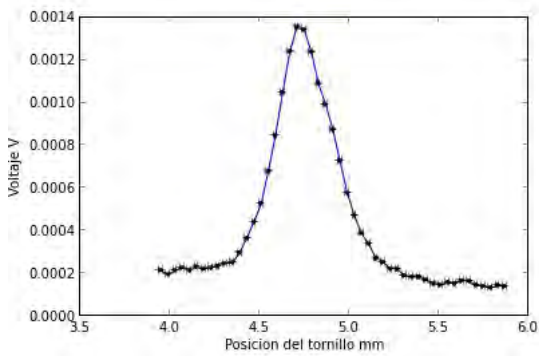


Fig 29. Azul.

4.2.5. LED violeta

Punto mínimo: 3.40mm
 Punto máximo: 5.0mm
 Número de puntos: 50
 Δ tornillo: 0.05mm

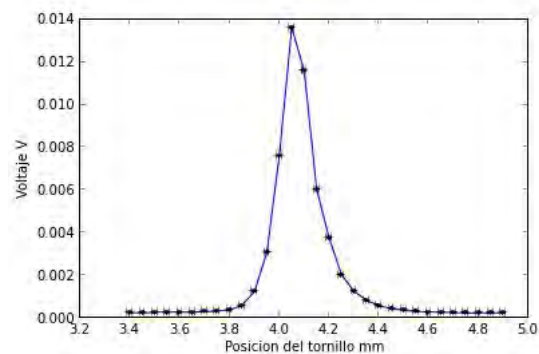


Fig 30. Violeta.

4.2.6. LED blanco

Punto mínimo: 3.30mm
 Punto máximo: 8.10mm
 Número de puntos: 160

Δ tornillo: 0.03mm

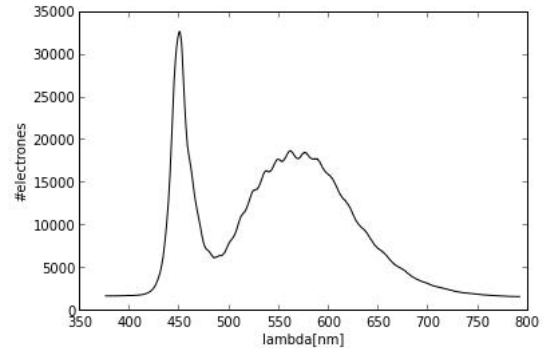


Fig 31. Blanco.

4.2.7. LED infrarrojo cercano

Punto mínimo: 6.5mm
 Punto máximo: 10.5
 Número de puntos: 20
 Δ tornillo: 0.2mm

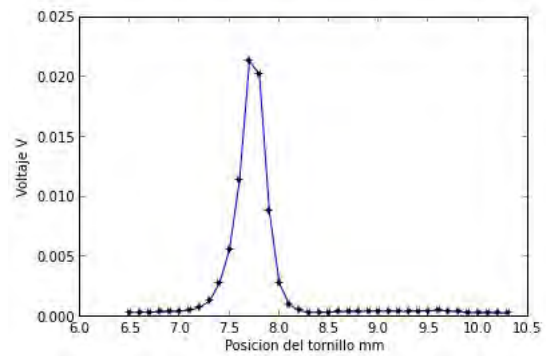


Fig 32. Inf. cercano.

4.2.8. LED 810 nm

Punto mínimo: 7.5mm
 Punto máximo: 10.5mm
 Número de puntos: 30
 Δ tornillo: 0.1mm

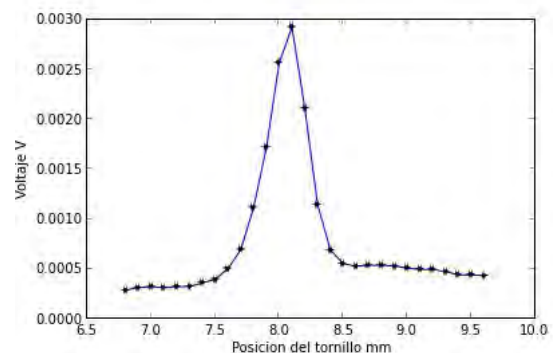


Fig 33. 810nm.

4.2.9. LED Infrarrojo

La longitud de onda en la que emitia este LED no era detectable por el monocromador, por lo tanto no fue posible realizar mediciones.

4.2.10. Calibración

Después de obtener todas las gráficas de los espectros experimentalmente con el monocromador y tomando como referencia o como datos teóricos los espectros obtenidos con el espectrómetro se compararon las gráficas para cada LED y de esta forma se logró obtener la ecuación que relacionaba la posición en el tornillo micrométrico con la longitud de onda mediante análisis por regresión lineal. La calibración realizada fue indirecta dado que se usaron los datos que se habían tomado con un instrumento previamente calibrado como era el espectrómetro.

Para tener una idea del modelo a aplicar, se obtuvo la siguiente gráfica que relaciona la longitud de onda en el espectrómetro contra la posición del tornillo micrométrico.

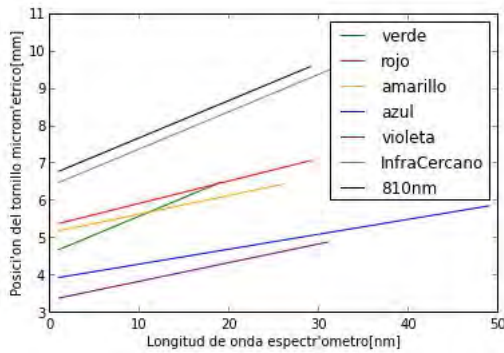


Fig 34. Todos los LED's.

De esta gráfica se pudo verificar que sería una relación lineal tal y como se había pensado inicialmente. En ese sentido se tomaron los valores máximos de las gráficas y se generaron parejas posición tornillo(x), longitud de onda(y).

Posicion tornillo[mm]	Lambda[nm]
5.3	524.11
6.48	637.87
5.95	587.25
4.71	464.23
4.56	449.53
4.05	402.17
7.7	771.24
8.1	791.38

Se realizó el análisis y la relación encontrada fue:

$$y = 98,57x + 1,21$$

$$rvalue = 0,9993$$

4.3. Resolución monocromador

Para encontrar la resolución del monocromador o en otras palabras el ancho de banda del filtro se analizaron dos muestras que se creía emitían a una sola longitud de onda.

La primera de ellas es la lámpara de hidrógeno en la línea

de emisión en rojo. Para esta fuente se realizaron pasos lo mas fino posibles, es decir de a $10\mu m$ y se observó alrededor de dicha línea. Usando la relación encontrada en la sección de calibración se logró obtener la gráfica en longitudes de onda en nm para dos mediciones independientes.

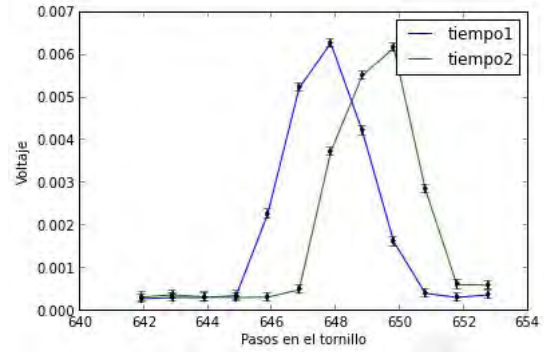


Fig 35. Línea 656.3 nm .

Entonces para la línea roja del hidrógeno se obtuvieron los siguientes datos:

- Maximo voltaje1=0.00628
- Maximo voltaje2=0.00617
- Longitud de onda maxima1=647.8292
- Longitud de onda maxima2=649.8006
- Maximo1/2=0.00628
- Maximo2/2=0.00617
- Delta longitud1=3.9428
- Delta longitud2=2.9571

Análogamente, se realizó el mismo análisis para un láser a 808nm. Se obtuvo la siguiente relación:

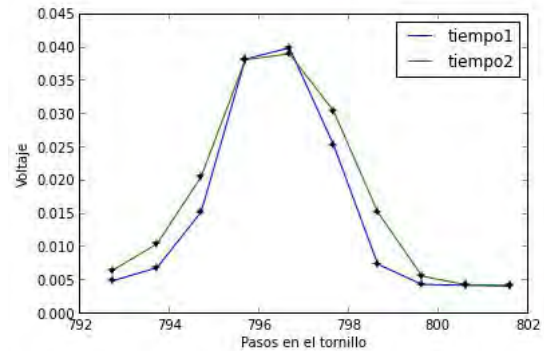


Fig 36. Láser 808nm.

Para el ancho se obtuvo:

- Maximo voltaje1=0,04 ± 0,0001V
- Maximo voltaje2=0,0391 ± 0,0001V
- Longitud de onda maxima1=796,6699 ± 2,19nm
- Longitud de onda maxima2=796,6699 ± 2,19nm
- Maximo1/2=0,02 ± 0,0001V
- Maximo2/2=0,01955 ± 0,0001V
- Delta longitud1=2,9571
- Delta longitud2=3,9428

5. Discusión y Conclusiones

5.1. Características monocromador

5.1.1. Relación longitud de onda y tonillo micrométrico

A partir de los resultados obtenidos en la sección anterior, se encontró que la relación entre la longitud de onda que se obtiene a la salida del monocromador y la posición en el tornillo micrométrico del mismo, es lineal.

De manera general se encontró que la relación es diferente para cada LED de acuerdo al montaje, mediciones realizadas y calibración hecha. Esta relación puede describirse como se sigue:

$$\text{Longitud de onda} = 98,57 * \text{posición del tornillo (mm)} + 1,21 \text{ nm}$$

De este modo, cualquier posición del tornillo puede relacionarse con longitud de onda de esta manera lineal como se espera.

Con certeza no despreciable, esto es válido debido a que la relación se obtuvo a partir de datos particulares en el espectro construido con el monocromador (picos), que aunque no eran discretos, estaba calibrado con el espectrometro que a su vez estaba calibrado con una fuente con líneas de emisión discretas.

5.1.2. Eficiencia

Es en este punto en donde utilizar este instrumento óptico de medición resulta poco útil al momento de querer filtrar espectros con una fuente de poca intensidad. La relación de la potencia de entrada de 0,458 mW con la potencia de salida de 0,00276 mW proporciona la eficiencia del monocromador LEOI-92 correspondiente a un porcentaje del 0,6 luz a la salida del instrumento. Utilizando sensores mucho más sensibles, como es el caso de las cámaras CCD, se permitiría el uso de fuentes con potencias menores a 0,458 mW; sin embargo, la eficiencia sigue siendo bastante baja. En caso de necesitar filtrar fuentes de un solo fotón, por ejemplo, la detección sería muy difícil de conseguir por lo que no se recomendaría el uso del monocromador para filtrarla.

5.2. Resolución

Anteriormente en resultados se mostró la toma de datos más fina posible que puede realizarse con el monocromador LEOI-92. Esta medida más fina posible corresponde a movimientos manuales de 0,01 mm en el tornillo micrométrico; utilizando la función lineal obtenida en la calibración indirecta del monocromador, la medida más fina posible corresponde a 5.50 nm. De este modo es importante determinar el ancho de banda correspondientes a las longitudes de onda que cruzan la abertura de 0.3 mm en la salida del monocromador. De acuerdo a los que se mostró en los resultados para la línea de emisión roja del espectro del hidrógeno y para el la región del pico hallado durante la construcción del espectro del láser de 808 nm, la resolución del monocromador corresponde a un valor entre 3nm y 4 nm. De manera más clara podría especificarse como que la resolución es [2.5 - 0.5 nm, 2.5 + 0.5 nm];

2.5 +- 0.5 nm. En términos generales, la resolución dada por el proveedor se encuentra dentro de este intervalo; de acuerdo a las especificaciones, el monocromador tiene una resolución de 3nm.

En cuanto a los espectros obtenidos en el espectrometro y en el monocromador, puede decirse que los picos, datos relativamente sencillos se obtienen en un espectro, son cercanos. Además, el perfil horizontal de los espectros medidos con ambos instrumentos es muy similar.

Finalmente es importante resaltar en cuanto al monocromador que el intervalo de medición válido está dado entre 0,66 mm, en donde el espectro empieza a abrirse, y 10,5 mm en donde la rejilla que abre el espectro deja de rotar; en consecuencia, el espectro ya no se está moviendo a lo largo de la abertura de salida.

El dato de los picos en los gráficos mostrados, o como podría decirse, en donde emite cada LED se muestra a continuación:

Rojo 639.961607516 nm Verde 523.646694629 nm Amarillo 587.718468677 nm Azul 465.489238186 nm Blanco 450.703444175 nm Violeta 400.431744537 nm Infrarrojo cercano 760.219398806 nm Led 810 nm 799.648182836 nm

Los fabricantes de por lo menos el LED de 810 nm y el láser de 808 nm, no fueron muy específicos al momento de vender su producto. De acuerdo a los datos tomados por el monocromador, el LED de 810 nm es en realidad un LED de 799.65 nm y el láser de 808 nm es en realidad de aproximadamente 804 nm.

Por otro lado, el fabricante afirma que el monocromador LEOI-92 opera entre regiones del espectro entre 200 nm y 800 nm, con la toma de datos hecha tanto para el LED 810 nm y el láser 808 nm, se concluye que el rango de operación de este monocromador es más amplio respecto al especificado por el fabricante, alcanza a cubrir región del infrarrojo. Anteriormente en resultados se mostró la toma de datos más fina posible que puede realizarse con el monocromador LEOI-92. Esta medida más fina posible corresponde a movimientos manuales de 0,01 mm en el tornillo micrométrico; utilizando la función lineal obtenida en la calibración indirecta del monocromador, la medida más fina posible corresponde a 5.50 nm. De este modo es importante determinar el ancho de banda correspondientes a las longitudes de onda que cruzan la abertura de 0.3 mm en la salida del monocromador. De acuerdo a los que se mostró en los resultados para la línea de emisión roja del espectro del hidrógeno y para el la región del pico hallado durante la construcción del espectro del láser de 808 nm, la resolución del monocromador corresponde a un valor entre 3nm y 4 nm. De manera más clara podría especificarse como que la resolución es [2.5 - 0.5 nm, 2.5 + 0.5 nm]; 2.5 +- 0.5 nm. En términos generales, la resolución dada por el proveedor se encuentra dentro de este intervalo; de acuerdo a las especificaciones, el monocromador tiene una resolución de 3nm.

En cuanto a los espectros obtenidos en el espectrometro y en el monocromador, puede decirse que los picos, datos relativamente sencillos se obtienen en un espectro, son cercanos. Además, el perfil horizontal de los espectros medidos con ambos instrumentos es muy similar.

Finalmente es importante resaltar en cuanto al monocromador que el intervalo de medición válido está dado entre

0,66 mm, en donde el espectro empieza a abrirse, y 10,5 mm en donde la rejilla que abre el espectro deja de rotar; en consecuencia, el espectro ya no se esta moviendo a lo largo de la abertura de salida.

El dato de los picos en los graficos mostrados, o como podria decirse, en donde emite cada LED se muestra a continuacion:

Rojo 639.961607516 nm Verde 523.646694629 nm Amarillo 587.718468677 nm Azul 465.489238186 nm Blanco 450.703444175 nm Violeta 400.431744537 nm Infrarrojo cercano 760.219398806 nm Led 810nm 799.648182836 nm

Los fabricantes de por lo menos el LED de 810 nm y el laser de 808 nm, no fueron muy especificos al momento de vender su producto. De acuerdo a los datos tomados por el monocromador, el LED de 810 nm es en realidad un LED de 799.65 nm y el laser de 808 nm es en realidad de aproximadamente 804 nm.

Por otro lado, el fabricante afirma que el monocromador LEOI-92 opera entre regiones del espectro entre 200 nm y 800 nm, con la toma de datos hecha tanto para el LED 810 nm y el lase 808 nm, se concluye que el rango de operacion de este monocromador es mas amplio respecto al especificado por el fabricante, alcanza a cubrir region del infrarrojo.

6. Bibliografía

[1] *Differences between Monochromators and Spectrographs*. LOT-QuantumDesign Europe. Tomado de: http://www.lot-qd.de/files/downloads/gilden/eu/The_difference_between_Monochromators_and_Spectrographs_eu.pdf [2] *Tutorial comunicaciones ópticas*. LOT-QuantumDesign Europe. Tomado de: http://nemesis.tel.uva.es/images/tCO/contenidos/tema2/tema2_21.htm [3] *Colores esp*
www - elec.inaoep.mx/ rogerio/Colores