

# DESARROLLO DE UN ESPECTRÓMETRO DE DIFRACCIÓN Y SU PROGRAMA DE CONTROL UTILIZANDO ELEMENTOS COMERCIALES DE BAJO COSTO\*

DEVELOPMENT OF A DIFFRACTION SPECTROMETER AND ITS CONTROL PROGRAM USING COMMERCIAL, LOW-COST ELEMENTS\*

O. ORMACHEA, O. URQUIDI<sup>†</sup> Y J. CISNEROS

Centro de Investigaciones Ópticas (CIO), Universidad Privada Boliviana. o.urkidi@gmail.com<sup>†</sup>

<sup>†</sup> autor para la correspondencia.

(Recibido 13/4/2012; Aceptado 18/4/2013)

Se desarrolló un espectrómetro de difracción con elementos comerciales de bajo costo. Se diseñó con la configuración de un espectrómetro con rejilla de difracción por transmisión y entrada de luz regulable. Se construyó con elementos comerciales y de descarte como una rejilla de difracción holográfica, lente colimadora y objetivo de proyector digital. Para la detección se usó el sensor CMOS de una cámara web comercial. Se desarrolló un programa de control en MATLAB para la obtención y procesamiento de los espectros con el equipo. Calibrando la longitud de onda de forma no lineal se corrigieron los defectos ópticos. Se incrementó en 14 veces el SNR del espectro final procesando los datos. El equipo presentó una resolución efectiva de 1.4 nm y una precisión de  $\pm 0.28$  nm en las pruebas finales, demostrando ser funcional con un costo 10 veces menor (en materiales) al precio comercial de un equipo similar (Ocean Optics USB4000).

A diffraction spectrometer was developed, based on low cost commercial elements. The spectrometer was designed with the configuration of a transmission diffraction grating spectrometer with adjustable entrance slit. It was built with commercial elements like a holographic grating, collimator lens and a digital projector lens. For detection, a webcam CMOS sensor was used. A MATLAB based program was developed for the equipment, allowing the acquisition and processing of spectra. The optical defects were corrected using a non linear wavelength calibration. The SNR of final spectrum was increased in 14 times by processing the data. The Spectrometer showed an effective resolution of 1.4 nm and a precision of  $\pm 0.28$  nm in final tests, showing to work properly with a cost 10 times lower (in materials) to the commercial price of a similar equipment (Ocean Optics USB4000).

**PACS:** Visible and ultraviolet spectrometers, 07.60.Rd, Image processing in optics, 42.30.-d, Holographic gratings, 42.40.Eq

## INTRODUCCIÓN

El desarrollo tecnológico de los últimos años ha crecido de gran manera, reduciendo costos, y permitiendo un acceso más libre a tecnología de punta. Todo esto ha puesto al alcance de todos, tecnologías que pueden ser utilizadas como punto de partida para el desarrollo de sistemas de complejidad considerable.

En el área óptica, el desarrollo de sistemas de obtención de imágenes digitales con el uso de sensores CCD y CMOS en cámaras web y fotográficas, ha permitido la digitalización y computarización de sistemas con un costo muy bajo. Así otros sistemas óptico-electrónicos que incluyen una gran variedad de elementos ópticos, brindan una fuente de recursos para la construcción de otros sistemas. También los sistemas computacionales juegan un papel importante en la actualidad, siendo el punto de unión ente estos elementos tecnológicos y finalmente potenciando sus características.

\* Artículos presentados en el VII Taller internacional TECNOLÁSER y III Reunión de Óptica, Vida y Patrimonio (La Habana, abril de 2012)

Uno de los sistemas ópticos de medición más importante es el espectrómetro. Al ser un sistema que permite la descomposición de la luz en sus diferentes longitudes de onda, es ampliamente utilizado en el análisis de fuentes luminosas en diferentes áreas profesionales y científicas. Dada la importancia de este elemento de medición, en el Centro de Investigaciones Ópticas de la Universidad Privada Boliviana, se inició el desarrollo de este equipo aplicando tecnologías comerciales y de bajo costo.

En el presente trabajo se presenta el desarrollo y construcción de un espectrómetro de difracción en el espectro visible, utilizando como base de funcionamiento, elementos comerciales de bajo costo y de fácil obtención como el sensor CMOS de una cámara web, una rejilla de difracción holográfica de bajo costo y lentes obtenidas de proyectores digitales en desuso. Todo esto fue combinado con un programa computacional capaz de controlar el espectrómetro y obtener los espectros en vivo, procesarlos y guardarlos para su posterior análisis.

La importancia de este tipo de desarrollo científico radica en el desarrollo tecnológico propio a un costo bajo, incluyendo elementos comerciales de alta tecnología en sistemas desarrollados netamente en Bolivia. También, es importante destacar que el desarrollo de espectrómetros de bajo costo abre una puerta hacia el desarrollo de otros sistemas de mayor complejidad dentro de nuestro país.

## SISTEMA ÓPTICO Y MECÁNICO DEL ESPECTRÓMETRO

*Configuración del espectrómetro* Desde el desarrollo de los primeros espectrómetros, su configuración ha sido compuesta por una rendija de entrada, un lente colimador, un elemento dispersor y un telescopio. Para fines fotográficos, el ocular del telescopio era reemplazado por una emulsión fotográfica [1]. En la actualidad se reemplaza la emulsión con un sensor CCD o CMOS para obtener una imagen digitalizada del espectro.

Las permitividades y las pérdidas dieléctricas fueron medidas dinámicamente desde 77 hasta 500 K a razón de 1.5 K por minuto con un medidor de precisión LCR HP4284A en el rango de frecuencias de 100 Hz a 1 MHz. Las mediciones se llevaron a cabo durante el calentamiento en el vacío mediante un Criostato Janis VPF 700 acoplado a un controlador de temperatura Lakeshore 331.

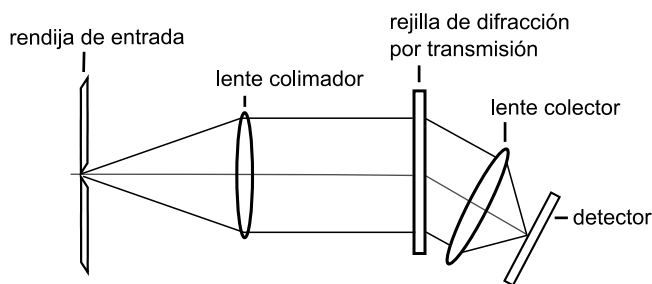


Figura 1. Configuración de un espectrómetro basado en una rejilla de difracción por transmisión. [1]

*Selección del objetivo colector* A diferencia de la lente de colimación cuya función es la de formar un haz paralelo, la lente de recolección de luz se encarga de formar la imagen del espectro en el detector, la combinación de esta lente y el detector se asemeja a la configuración de una cámara. Toda lente presenta aberraciones, como la aberración esférica, coma, astigmatismo, distorsión y aberración cromática [2]. Estas aberraciones distorsionan la imagen formada por la lente y no son deseables en la formación de imágenes.

Para obtener imágenes de campos de visión estrechos y disminuir satisfactoriamente las aberraciones fuera de eje (coma, astigmatismo y distorsión) y las aberraciones esféricas, usualmente solo es necesario utilizar una lente plano-convexa, sin embargo la aberración cromática seguirá existiendo. Para amplios campos de visión las aberraciones aumentan, y al ser la situación más crítica se suelen usar por lo menos dos lentes combinadas para corregir estas aberraciones, incluyendo la aberración cromática, siendo la más simple la lente doble

acromática. Esta última combinación de lentes es la base de la construcción de los objetivos fotográficos utilizados para la formación de imágenes libres de aberraciones y que normalmente contienen varias lentes que contrarrestan unas con otras las diferentes aberraciones [2].

En el caso del espectrómetro fue necesario encontrar un objetivo colector capaz de formar imágenes de un amplio campo de visión con una baja presencia de aberraciones fuera de eje, aberración esférica y cromática, siendo un objetivo fotográfico el más adecuado.

Los objetivos de proyección utilizados en proyectores digitales modernos tienen casi el mismo grado de corrección de aberraciones que los objetivos fotográficos, ya que deben proyectar imágenes claras y libres de aberraciones [3]. De manera experimental se encontró que un objetivo de proyector digital marca Epson con aproximadamente 30 mm de distancia focal y sin mecanismo de zoom cubría todo el espectro visible y sin aberraciones pronunciadas, siendo ideal para el espectrómetro.

*Diseño del sistema óptico* El diseño del sistema óptico se basó en elementos ópticos disponibles, fácilmente encontrados en proyectores y otros dispositivos de descarte. Se diseñó el espectrómetro utilizando la configuración descrita anteriormente con una rejilla de difracción por transmisión.

Se decidió utilizar una rejilla de difracción por transmisión por tener un costo muy bajo respecto a otro tipo de rejillas de difracción. Para este espectrómetro se utilizó una rejilla de difracción de 500 líneas/mm.

Como lente de colimación se usó una lente plano-convexa de 50 mm de diámetro y 96 mm de distancia focal. Para el elemento encargado de formar la imagen en el sensor CMOS se utilizó el objetivo de un proyector digital Epson de aproximadamente 30 mm de distancia focal.

Como detector se usó el sensor CMOS de una cámara web de 1280 x 960 píxeles. Se eligió una cámara web capaz de un control manual limitado para poder fijar los parámetros de obtención de la imagen y hacer repetible el proceso de medición.

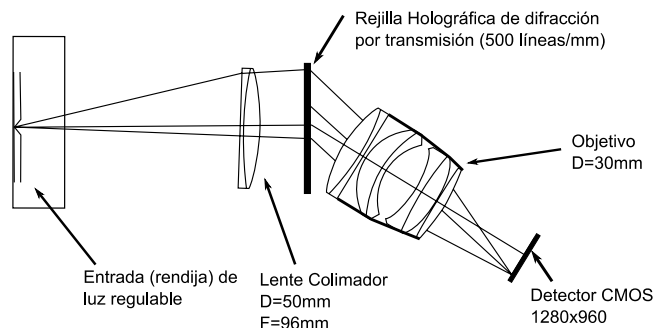


Figura 2. Diseño del sistema óptico del espectrómetro con elementos de fácil obtención.

Entrada de luz ajustable. Para la entrada de luz regulable se diseñó un sistema mecánico basado en dos cuchillas para afeitar y elementos

comerciales de sujeción como pernos y perfiles de aluminio. La función del sistema es aumentar o disminuir el ancho de la rendija con cuatro tornillos, dos a cada lado, con el objetivo de variar la cantidad de luz que entra al espectrómetro y la resolución.

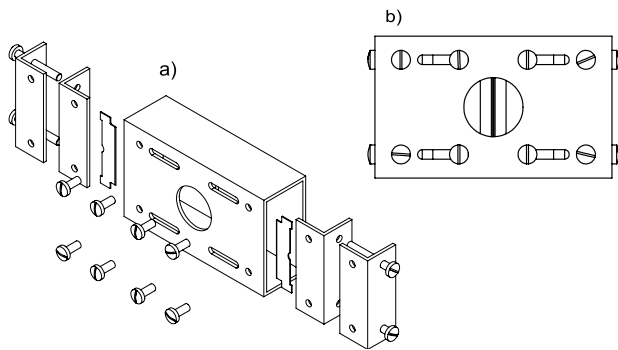


Figura 3. Diseño mecánico del sistema de entrada de luz ajustable utilizando perfiles de aluminio, resortes, pernos y un par de cuchillas de afeitar para generar la rendija. a) Sistema sin ensamblar b) Sistema ensamblado.



Figura 4. Sistema de entrada de luz (rendija) ajustable construido.

**Montaje final del espectrómetro** Tanto la lente de colimación como la rejilla de difracción se montaron en perfiles de aluminio. El objetivo se montó en el elemento de sujeción original del proyector, el cual se cortó y acomodó para permitir el montaje del sensor CMOS de la cámara web junto con sus elementos electrónicos. El objetivo y el sensor se montaron juntos a modo de cámara para permitir un mejor ajuste del ángulo respecto al eje óptico del sistema.

Luego de realizar el proceso de alineación de los elementos y de comprobar su funcionamiento, se aseguró cada pieza a un tablero de aglomerado de madera y se cubrió el sistema con una caja para evitar la perturbación de fuentes de luz externas.

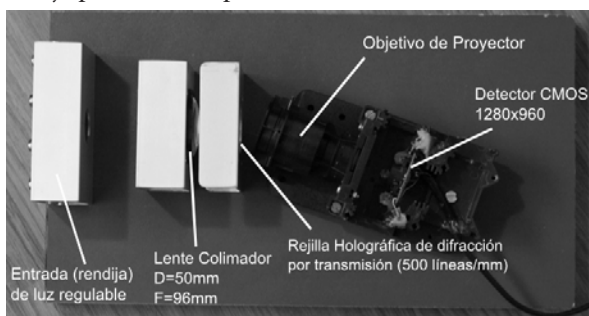


Figura 5. Montaje final del espectrómetro.



Figura 6. Espectrómetro terminado y cubierto.

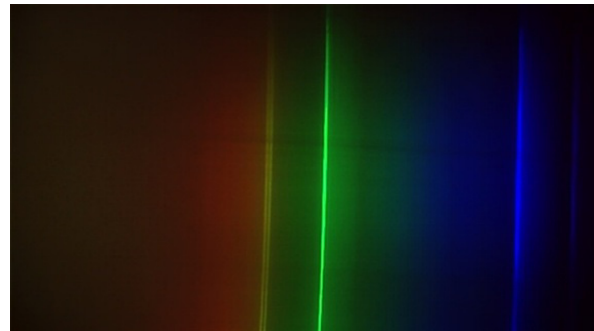


Figura 7. Imagen del espectro de una lámpara de sodio obtenida con el espectrómetro terminado.

Luego del montaje final se procedió al ajuste del foco y a la comprobación del funcionamiento del espectrómetro utilizando una lámpara de mercurio como fuente luminosa como se muestra en la Figura 7.

## PROGRAMA DE CONTROL

El programa de control fue desarrollado enteramente en MATLAB, tanto para adquirir los datos del sensor CMOS como para procesarlos posteriormente. El programa fue desarrollado con la capacidad de mostrar en tiempo real el espectro de la luz analizada, además de poder cambiar el tiempo de exposición porcentual de la cámara. El programa también permite guardar los datos de los espectros en un archivo de texto, así como realizar un procesamiento de imagen para mejorar la calidad del espectro final. El programa, para poder mostrar correctamente la escala de longitud de onda, utiliza un archivo de calibración generado por otro programa especialmente diseñado para este propósito.

Ya que el sensor CMOS está compuesto por un mosaico de Bayer para producir imágenes a color, el programa convierte la imagen RGB en monocromática sumando los tres canales para formar uno solo. Luego extrae una fila de píxeles de la región de mayor calidad de imagen del sensor para graficar la intensidad plasmada en cada píxel en una escala de 0 a 255 (imagen de 8 bits). La gráfica de estas intensidades respecto a cada píxel relacionado con una longitud de onda (relación determinada con la calibración previa) representa la gráfica del espectro como se muestra en la Figura 8.

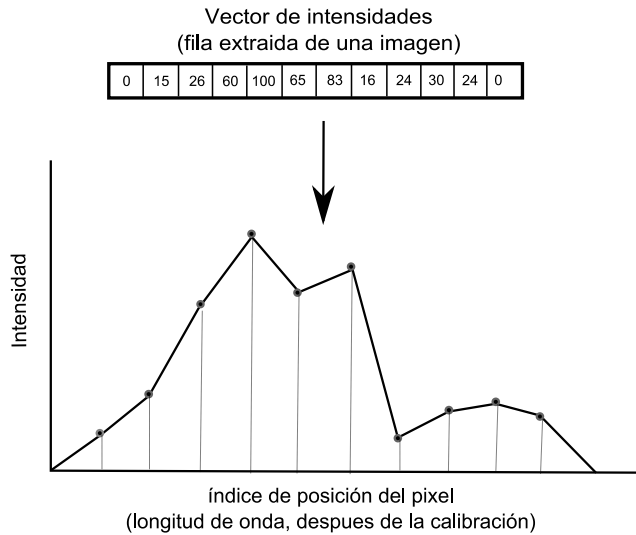


Figura 8. Espectro final generado en base a los valores de intensidad de un vector y a sus índices de posición. Los índices de posición se convierten en longitudes de onda después de la calibración.

## CALIBRACIÓN DEL ESPECTRÓMETRO

La práctica siguiente [4] es la más utilizada para realizar la calibración de longitud de onda en un espectrómetro, que se basa en el ajuste de una ecuación a las posiciones de líneas espectrales conocidas. La forma más simple y utilizada de esta ecuación es un polinomio de la forma siguiente.

$$\lambda(n) = A + Bn + Cn^2 + Dn^3 + \dots \quad (1)$$

donde  $n$  es el índice de píxeles en el eje horizontal del sensor,  $\lambda$  es la longitud de onda en esa posición y  $A, B, C$ , etc., son los coeficientes a ser determinados por regresión.

Para la calibración se utilizaron 4 líneas del espectro de una lámpara de mercurio, generando un polinomio de tercer orden en MATLAB. No se vio la necesidad de utilizar un polinomio de un grado mayor ya que una comparación de longitudes de onda realizada por Brownrigg [4] en el rango 340-692 nm, entre el método exacto (ecuación de la rejilla de difracción) y la expansión de series de Lindrum y Nickel [5] mostró que el aumento de orden más allá del tercer orden no afecta en gran medida la precisión en longitud de onda.

Para la calibración se utilizaron las líneas espectrales de una lámpara de mercurio de 404.66, 434.75, 546.07 y 576.96 nm [4], las cuales están entre las más común-mente usadas para calibración.

## PROCESAMIENTO DE IMAGEN

Debido a la gran cantidad de ruido generado por el sensor CMOS utilizado, el programa también cuenta con la opción de realizar un procesamiento de imagen para mejorar la calidad del espectro final, que se puede expresar con la relación de señal versus ruido (SNR). Este procesamiento de información tiene como objetivo restarle a la información final los defectos

y errores causados por inestabilidades inherentes al dispositivo de adquisición de los datos (sensor CMOS). Estos errores y defectos se presentan en forma de ruido, el cual perjudica la calidad y claridad del espectro final. El ruido puede presentarse de forma permanente, siendo defectos físicos en el sensor los que lo generan, o de forma aleatoria como variaciones pasajeras en la medición de cada píxel del sensor. Para este trabajo se utilizaron algunos métodos conocidos [6] para reducir de manera considerable los efectos de ambos tipos de ruido.

*Substracción de ruido estacionario* Este tipo de ruido está presente en todas las imágenes, incluso al cambiar de escena. Para eliminar este ruido se obtiene una imagen sin escena, esto significa que se debe tomar una imagen cubriendo la entrada de luz del espectrómetro y así solo obtener en la imagen el ruido producido por los defectos del sensor (darkframe) para luego restarla a la imagen del espectro como se expresa en la siguiente expresión.

$$Q_i[m, n] = P_i[m, n] - D[m, n] \quad (2)$$

donde  $Q$  es la imagen resultante sin ruido estacionario,  $P$  es la imagen que lleva la información del espectro y  $D$  es la imagen que solo contiene el ruido estacionario (darkframe).

*Reducción de ruido transitorio* El ruido aleatorio se presenta de manera aleatoria en las imágenes y tiene la misma probabilidad de aparecer en cada píxel de la imagen. Para reducir la presencia del ruido aleatorio en una imagen se realiza la suma de múltiples imágenes que contengan la misma información de escena, dando como resultado un aumento en el SNR de la imagen. Si bien una imagen está representada por una matriz, al ser este un método punto a punto de atenuación de ruido, este método también es aplicable a un vector.

$$R[n] = \sum_{i=1}^T Q_i[n] \quad (3)$$

Una buena forma de medir la presencia de ruido es la relación entre señal y ruido (SNR), la cual está definida por la relación entre la desviación estándar de la señal esperada y del ruido.

$$SNR = \frac{\sigma_s}{\sigma_e} \quad (4)$$

Realizando un análisis estadístico [6], el SNR después de la suma de múltiples imágenes se incrementa por un factor igual a la raíz cuadrada del número de imágenes sumadas  $T$ .

$$SNR_r = \sqrt{T} \frac{\sigma_s}{\sigma_e} \quad (5)$$

Para reducir la presencia de este ruido en la imagen del espectro se realizó una suma de múltiples filas adyacentes de la imagen conteniendo la misma información de escena (el espectro).

Se sumaron 200 vectores horizontales adyacentes verticalmente, correspondientes a la región vertical de mayor calidad en el espectro. Del resultado de la suma se obtuvo un vector con un factor de incremento de su SNR de 14 veces.

## RESULTADOS

**Precisión en longitud de onda** Para la obtención de un rango de precisión del espectrómetro se midieron varias líneas de una lámpara de sodio y se compararon con los valores reales para obtener un error, que se promedió al final. Este error representa el intervalo de precisión del espectrómetro, que resultó ser  $\pm 0.28$  nm.

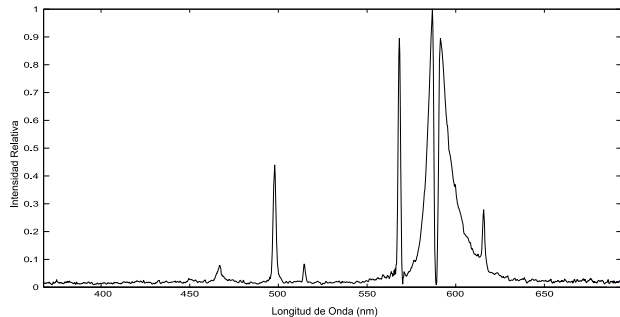


Figura 9. Espectro de una lámpara de sodio obtenido con el espectrómetro desarrollado

Línea espectral	$\lambda$ real (nm)	$\lambda$ medida (nm)	Error
Na I 466.85	466.85	467	0.15
Na I 497.85	497.32	497.9	0.58
Na I 514.88	514.88	514.5	0.38
Na I 568.26	568.26	568.2	0.06
Na I 616.07	616.07	615.8	0.27
Error promedio			0.288

**Incremento de SNR por procesamiento de imágenes** La Figura 10 muestra el espectro de una lámpara de mercurio obtenida de una sola fila de píxeles del sensor al 100% de exposición, sin ningún procesamiento de imagen para la disminución de ruido. La Figura 11 muestra el espectro de la misma lámpara con el procesamiento de imagen para la disminución de ruido, aumentando en 14 veces su SNR.

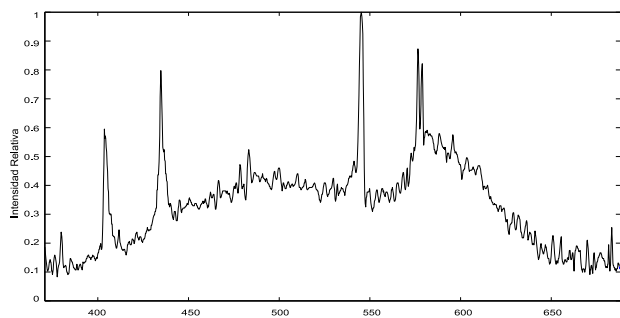


Figura 10. Espectro de una lámpara de mercurio sin procesamiento.

**Resolución efectiva del espectrómetro** Los espectrómetros no son perfectos y registran una línea espectral con un ancho finito. Esto se conoce como el “perfil instrumental de línea” y puede ser determinado por la caracterización del espectro de un láser o de una lámpara de baja presión de emisión Hg1/Ar1 con la rendija de entrada a su mínima apertura.

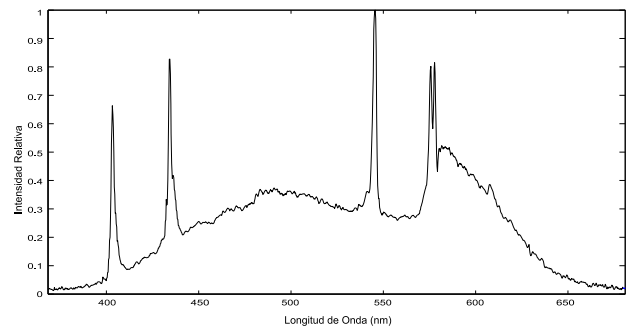


Figura 10. Espectro de una lámpara de mercurio luego del procesamiento para la reducción de ruido.

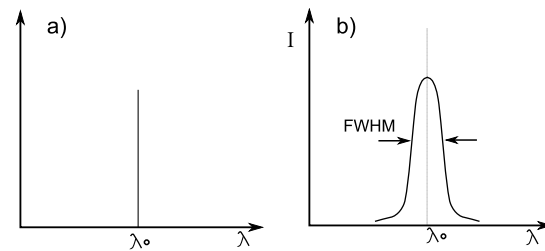


Figura 12. a) Espectro de una fuente monocromática obtenido por un espectrómetro ideal, b) Espectro de una fuente monocromática obtenido por un espectrómetro real. [8]

La resolución es la habilidad límite de un instrumento para separar dos líneas espectrales. El paso de banda (bandpass) es el ancho a la mitad del perfil de la línea espectral (FWHM) del espectro detectado (Figura 12). El mínimo paso de banda posible es la resolución y se determina cuando el FWHM de una línea monocromática de emisión no se reduce más, aun cuando la rendija continua siendo cerrada [8].

Se obtuvo el FWHM de la línea de emisión de 434.4 nm de una lámpara de mercurio, escogida arbitrariamente. El FWHM, siendo igual a la resolución fue de 1.4 nm. Esto se comprobó ya que el espectrómetro fue capaz de resolver la separación de aproximadamente 2 nm entre las líneas de 575.7 y 577.8 nm de la lámpara de mercurio.

## CONCLUSIONES

Se consiguió desarrollar y construir un espectrómetro de difracción por transmisión en el rango 370-680 nm, con una resolución efectiva aproximada de 1.4 nm y una precisión de  $\pm 0.28$  nm, utilizando una rendija ajustable, una rejilla de difracción por transmisión, una lente colimadora y el objetivo de un proyector.

Se desarrolló exitosamente el programa de control basado en MATLAB para el control del espectrómetro, siendo de suma importancia para el potenciamiento de las capacidades del espectrómetro construido. Permitiendo realizar correcciones a los defectos ópticos del sistema por medio de una calibración no lineal de longitud de onda.

Se logró utilizar el sensor de una cámara CMOS como detector para la digitalización de los datos, con buenos resultados para fuentes luminosas estables en el tiempo. Con ayuda del

procesamiento de imagen se aumentó su SNR y así mejoraron sus prestaciones.

Los métodos de eliminación de ruido utilizados fueron de gran ayuda en el mejoramiento del SNR de los espectros, aumentando 14 veces el SNR de los espectros procesados. Después de la aplicación de este procesamiento se observó una mejora considerable en la calidad de los espectros finales.

El equipo desarrollado representa una herramienta de bajo costo para realizar la medición e identificación de fuentes luminosas, con una precisión y resolución comparable a la de espectrómetros comerciales y un costo 10 veces menor (en materiales) al precio comercial de un espectrómetro similar como el USB4000 de Ocean Optics.

#### PERSPECTIVAS

Con la modificación parcial del programa de control el espectrómetro puede ser utilizado para fines educativos, mostrando aparte de la grafica del espectro, la imagen a colores detectada por la cámara. El bajo costo y la facilidad de construcción hacen de este equipo ideal para fines educativos.

Para que un espectrómetro se convierta en una verdadera herramienta de medición es necesario realizar una calibración en

intensidad. Sin embargo, por lo experimentado en el desarrollo de este trabajo, la cámara con sensor CMOS utilizada no tiene la misma respuesta espectral en las diferentes exposiciones. Además de presentarse el inconveniente de ser una cámara con matriz de bayer y no monocromática. El siguiente paso en el mejoramiento de este equipo será la calibración y eliminación de defectos en respuesta a la intensidad.

---

[1] J. James, *Spectrograph Design Fundamentals*, (New York: Cambridge University Press, 2007).

[2] W. J. Smith, *Modern Optical Engineering*. (McGraw-Hill, 2008).

[3] D. Malacara and Z. Malacara, *Handbook of Optical Design*, (New York: Marcel Dekker, 2004).

[4] J. Thomas Brownrigg, **47**, 1007 (1993).

[5] M. Lindrum and B. Nickel, *Spectroscopy* **43**, 8 (1989).

[6] S. E. Reichenbach. (2011) *Pointwise Operations*. [Online]. <http://cse.unl.edu/~reich/CSCE472/Pointwise.pdf>

[7] Yu. Ralchenko, A. E. Kramida, J. Reader, and NIST ASD Team. (2011) National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD. [Online]. <http://physics.nist.gov/asd>.

[8] J. M. Lerner, *Cytometry* **69A**, 712 (2006).