

Diseño de un monocromador de alta resolución para el análisis de señales ópticas

Marcos F. Guerra Medina¹, Fernando Rivera López², Leopoldo Martín²,
Víctor Lavín Della Ventura², Inocencio R. Martín², Néstor E. Capuj², Oswaldo González¹

mfguerra@ull.es, frivera@ull.es, llmartin@tx.technion.ac.il, vlavin@ull.es, imartin@ull.es, capuj@ull.es, oghdez@ull.es

¹Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad de La Laguna,
38203, Av. Astrofísico Fco. Sánchez, S/N, La Laguna, España

²Departamento de Física, Universidad de La Laguna,
38203, Av. Astrofísico Fco. Sánchez, S/N, La Laguna, España

Abstract- The present work describes the design, implementation and calibration of a high resolution monochromator which is able to separate spectral components of light in the visible region of the electromagnetic spectrum. The developed prototype constitutes a low cost solution as compared with other similar commercial devices, but offering a noteworthy performance making it perfectly valid for research studies as well as educational purposes, the latter being the primary application for which it was conceived. The main element of the monochromator is a diffraction grating blazed at 500 nm that is moved by the action of a stepper motor, which is controlled by means of a microcontroller, device that simultaneously must digitize the data from the optical sensors and provide them to the main personal computer. Finally, an intuitive user interface, developed in G language, allows us to easily interact with the monochromator, save and display graphically the spectrum data, making the whole system a complete and useful tool for optical spectrum analysis by part of experienced researchers but also beginner students in optical spectroscopy.

Index Terms—Monochromator, optical fiber communication measurements, diffraction grating, PIC microcontroller, software for virtual instrumentation.

I. INTRODUCCIÓN

El estudio de las Comunicaciones Ópticas es uno de los grandes pilares de la Ingeniería. La comprensión y el dominio de la misma requiere de una formación que exige horas de prácticas e instrumentación específica bastante cara. No todos los departamentos disponen de los recursos económicos necesarios (máxime en los tiempos que corren), para equipar los laboratorios con el material exigible que garantice el aprendizaje de los alumnos con un mínimo de calidad.

Por otra parte, resulta imprescindible para la comprensión de las Comunicaciones Ópticas Guiadas el poder cuantificar la apertura numérica de la fibra óptica, el ángulo de aceptación de la misma y los diferentes modos que reflexionan en el núcleo. Preguntas como la potencia óptica que puede inyectarse en la fibra, la dispersión intermodal, la máxima velocidad de transmisión y la ganancia de los diferentes amplificadores ópticos, requieren de un equipamiento técnico específico que pueda dar respuesta a dichas cuestiones. Uno de esos instrumentos resulta ser el monocromador, cuyo precio excede con creces el presupuesto económico del que en numerosas ocasiones se dispone para la adquisición de nuevos equipos para la docencia práctica.

El presente trabajo pretende paliar esta realidad con el diseño de un monocromador sencillo y económico (al alcance de cualquier bolsillo), que permita adaptar la realidad de los presupuestos actuales con los tiempos que corren.

Los monocromadores son instrumentos ópticos capaces de aislar señales ópticas a determinadas longitudes de onda, proporcionando de esta manera radiaciones monocromáticas.

El prototipo diseñado tiene como elemento principal una red de difracción que opera en la región visible del espectro electromagnético. Esta red de difracción ha de ser gobernada mediante un motor que necesita una electrónica adecuada de control. A su vez, esta electrónica requiere de un protocolo de comunicaciones que sirve de interfaz entre el ordenador (centro de operaciones del usuario) y la electrónica. Así mismo, es necesario desarrollar un software específico que vincule el instrumento al usuario y que permita el control, cuantificación, e importación de los resultados para su posterior interpretación y análisis.

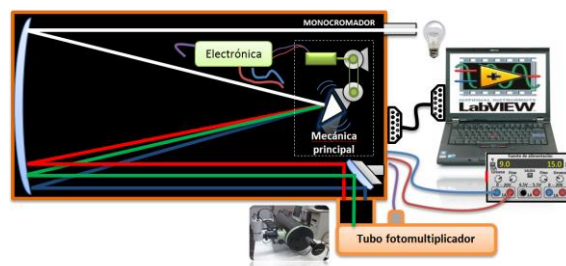


Fig. 1. Monocromador diseñado

La Fig. 1 ilustra una visión general del monocromador desarrollado y de los periféricos necesarios para su control y funcionamiento. Como puede verse, el sistema está configurado por tres elementos básicos: la estructura mecánica y el sistema óptico, donde las señales de entrada se procesan ópticamente; la electrónica para controlar el movimiento de las piezas mecánicas; y la interfaz gráfica de usuario (*software*) instalado en el ordenador. A continuación, se explican estos tres bloques con más detalle.

a) Mecánica y óptica:

El monocromador tiene una apertura de entrada, un espejo colimador que produce un haz de radiación paralela, una red de difracción que difracta la luz en varios haces que viajan en diferentes direcciones, un elemento focalizador y una rendija

de salida en la que normalmente se acopla un tubo fotomultiplicador para la adquisición de la señal.

b) *Electrónica:*

Requerida para controlar el motor paso a paso, este último responsable de posicionar la red de difracción en el ángulo adecuado para seleccionar la longitud de onda deseada. Además, digitaliza la señal analógica (valor de intensidad) proveniente del tubo fotomultiplicador de manera previa a la entrega de los datos al ordenador.

c) *Interfaz gráfica de usuario (software):*

Constituye la aplicación informática desarrollada para controlar el monocromador y extraer los datos para su posterior análisis.

Este trabajo se centra en el diseño y construcción de un monocromador dirigido a la enseñanza y las actividades de investigación. Su presentación se estructura de la siguiente manera: En la sección II se describen los fundamentos del monocromador y los elementos mecánicos esenciales necesarios para su construcción. La sección III detalla los componentes electrónicos y las conexiones entre ellos para proporcionar el control de todos los procesos del monocromador. La sección IV expone el software diseñado para utilizar el monocromador. En la sección V se analiza la calibración del monocromador con el fin de garantizar un funcionamiento perfecto y resultados precisos. Por último, las aplicaciones de enseñanza y conclusiones se resumen en las secciones VI y VII, respectivamente.

II. MONOCROMADOR

A. Conceptos previos

Como se muestra en la Fig. 2, la luz de una lámpara (o cualquier otra fuente de luz) entra en el monocromador a través de una abertura estrecha, la rendija de entrada. Esta luz policromática se refleja en un espejo cóncavo en el extremo de la estructura, que la colima y la dirige hacia la red de difracción. Este es el elemento óptico principal del monocromador, que es capaz de separar un haz policromático incidente en sus componentes primarias, es decir, es dispersivo. Cada longitud de onda del espectro del haz de entrada se dispersa en un ángulo de dirección diferente, hacia otro espejo que se encarga de reenfochar, en un ángulo determinado, los haces obtenidos (que ahora es de nuevo divergente) sobre la ranura de salida.

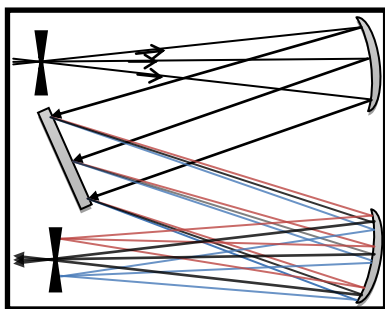


Fig. 2. Diagrama óptico de un monocromador

Por último, el haz seleccionado, de acuerdo a la orientación de la rejilla, incide sobre un tubo multiplicador en donde se mide la potencia óptica recibida, cuyo valor es posteriormente cuantificado (digitalizado).

B. Estructura del monocromador

El monocromador fue enteramente diseñado y desarrollado en un telescopio newtoniano [1,2] por varias ventajas. En primer lugar, esta estructura nos permite acomodar todos los componentes que integran el monocromador en un recinto hermético. Además, el telescopio ya incluye el espejo que orienta el haz monocromático en la última etapa hacia la rendija de salida del monocromador y consecuentemente hacia el tubo fotomultiplicador, facilitando así la instalación de una parte crucial en el diseño. En segundo lugar, el espejo cóncavo colimador también viene incorporado en un extremo del interior del telescopio, fijado con varios tornillos. Durante la fase de calibración, estos tornillos se pueden manipular, proporcionando un ajuste fino para el centrado del sistema con el fin de obtener la máxima intensidad en la señal de salida. Por último, el ocular del telescopio es de por sí una rendija de salida perfecta para el monocromador, puesto que ya está calibrada de fábrica, lo que implica una reducción significativa de error en su localización.

C. Red de difracción

La red de difracción es el elemento óptico más utilizado para difractar la luz en varios haces que viajan en diferentes direcciones. Las direcciones de esos haces dependen del espaciado de la red y de la longitud de onda de la luz incidente, de modo que la red actúa como un elemento dispersivo. El principio de este fenómeno se explica en el experimento de doble rendija de Young [3]. Si una onda plana incide sobre una rejilla de difracción con un ángulo θ_i , entonces los efectos de interferencia producen máximos de intensidad en el ángulo θ_m , según la siguiente relación:

$$d(\sin(\theta_i) + \sin(\theta_m)) = m\lambda \quad (1)$$

De acuerdo con esta ecuación, la red de difracción permite que el haz de la longitud de onda asociada a cada rendija sea difractada hacia la posición correspondiente al orden cero cuando su incidencia sea normal al plano de difracción; mientras que los órdenes mayores serán refractados con ángulos específicos definidos por la densidad de la red para cada orden seleccionado. La separación angular entre distintos órdenes decrece monótonamente conforme aumenta el número de orden, por lo que para órdenes superiores la separación entre los mismos tiende a desaparecer, mientras que los órdenes menores suelen quedar correctamente separados. Por lo tanto, la rejilla está diseñada con un perfil particular que se caracteriza por una "longitud de onda de trabajo", que corresponde a la longitud de onda donde la rejilla es más eficiente.

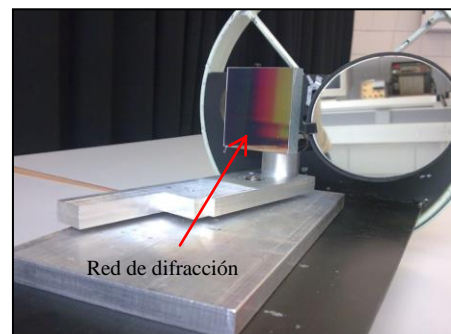


Fig. 3. Red de difracción

D. Mecanismo para mover la red de difracción

Como ya se ha comentado anteriormente, el ángulo de difracción de una determinada longitud de onda en un haz policromático depende de su ángulo de incidencia en la red. Dado que, para una fuente de luz estática, el espejo cóncavo es visto como una estructura fija, la única manera de seleccionar una longitud de onda concreta es girando la red de difracción un cierto ángulo. Dar una solución a este problema implicó la fabricación de piezas mecánicas móviles adicionales que nos permitiera moverla.

La Fig. 4 muestra dos de las piezas diseñadas que permiten el giro de la red de difracción. La parte superior (donde se coloca la red de difracción) bascula sobre la inferior por la acción de un motor paso a paso reciclado de un disco duro roto.

E. Mecanismo reductor

Con el fin de garantizar la precisión exigida por el sistema, se utilizó un micrómetro en conjunción con un mecanismo reductor, lo que nos permitió obtener una resolución espectral de $0,4 \text{ \AA}$ por fase del motor.

El mecanismo reductor fue íntegramente reciclado de piezas obsoletas de una impresora vieja, concretamente dos piñones y una correa dentada. Los piñones se instalaron en el motor paso a paso y entre este y el motor paso a paso se instaló la correa dentada (ver Fig. 5).

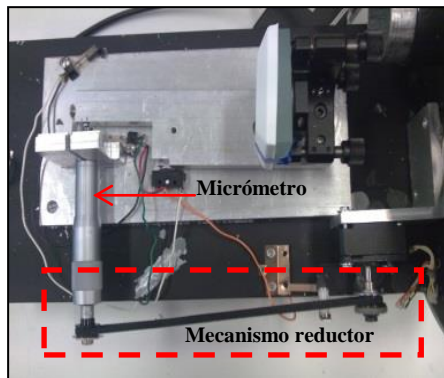


Fig. 4. Mecanismo reductor y micrómetro

III. ELECTRÓNICA

Todos los componentes electrónicos diseñados sirven para controlar el motor paso a paso y para implementar la interfaz entre el ordenador y el monocromador.

La placa electrónica comprende: 1) una interfaz de comunicación RS 232, 2) fuentes de alimentación de 12 y 5 V, 3) MAX232 (adaptador de tensiones de RS 232 a señales compatibles con los niveles TTL de circuitos lógicos), 4) PIC16F876 (microcontrolador principal), 5) PIC16F84A (microcontrolador secundario), 6) L293B (etapa de potencia) y 7) Conector para el tubo fotomultiplicador (sensor óptico).

A. Tubo fotomultiplicador

El tubo fotomultiplicador convierte la luz incidente en una señal eléctrica. Para ello, los fotones incidentes en el fotocátodo se convierten en electrones por efecto fotoeléctrico. Estos electrones son acelerados a través de diferentes dínodos con el fin de amplificar su número.

B. Microcontroladores PIC16F876 y PIC16F84A

El elemento principal de la tarjeta electrónica es el PIC16F876 [4,5], responsable de las tareas automáticas que se llevarán a cabo en el sistema.

El PIC fue programado para llevar a cabo dos tareas: la de servir como medio de comunicación entre el ordenador portátil y el monocromador, y la de enviar los comandos necesarios al PIC16F84A (esclavo del anterior), encargado del movimiento del motor paso a paso. Para controlar éste último fue necesario implementar una señal PWM (*Pulse-Width Modulation*, modulación por ancho de pulso), cuyo tiempo en alta indica el número de pasos que debe avanzar el motor, mientras otra señal lógica indica el sentido de giro del mismo. Estas señales son controladas por el PIC16F84A.

C. MAX232 y L293B

La función principal del dispositivo MAX 232 es conformar los niveles de tensión en la comunicación del puerto serie con los niveles de tensión TTL usados por los PIC. Por su parte, el L293B se utiliza como etapa final de potencia para el motor paso a paso.

IV. SOFTWARE

La interfaz gráfica que nos permite interactuar con el monocromador ha sido diseñada en lenguaje G con el software LabVIEW® [6] de la empresa *National Instrument* [7]. A continuación, se muestra una captura de pantalla del software diseñado durante el transcurso de un barrido en una toma de datos.

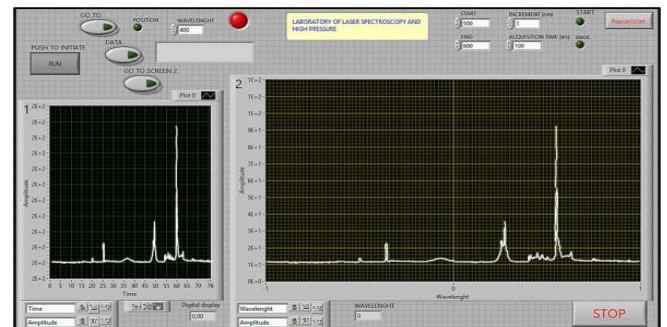


Fig. 5. Software diseñado para controlar el monocromador.

V. CALIBRACIÓN

Para calibrar el monocromador se utilizó una lámpara fluorescente compacta Lexman (CFL, *Compact Fluorescent Lamp*) [8], ya que presenta líneas finas de mercurio que son ideales para calibrar. El procedimiento en esta etapa consistió en la comparación de los espectros conocidos de la lámpara CFL obtenidos con un monocromador comercial con la del monocromador propuesto en este trabajo.

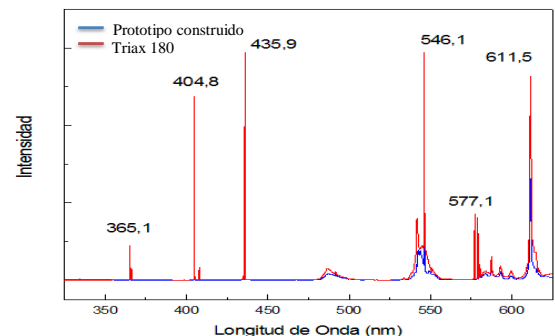


Fig. 6. Comparación de ambos espectros

Los resultados obtenidos se pueden apreciar en la Fig. 8, en el que el espectro medido por el monocromador diseñado (línea azul) se compara con la ofrecida por el comercial Triax 180 (línea roja) [9].

VI. APLICACIONES EN LA ENSEÑANZA

Este monocromador está especialmente diseñado para la enseñanza. La construcción de los componentes ópticos, mecánicos y electrónicos están especialmente indicados para los cursos de ingeniería donde se combinan diferentes disciplinas. Además, Las especificaciones de este monocromador permiten su uso como herramienta para la investigación.

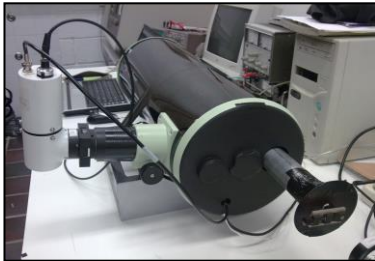


Fig. 7. Prototipo final diseñado

Como aplicación en la docencia, sirva el ejemplo de comparar el espectro de emisión obtenido con una lámpara CFL (cuyo espectro se muestra en la Fig. 8) con la de una lámpara incandescente comercial que tiene un espectro continuo en el visible. Estos resultados aclaran la importancia de las lámparas de bajo consumo con el fin de ahorrar energía.

Además, es posible incorporar una CCD comercial (*Charged-Coupled Device*, dispositivo de carga acoplada) a la salida del monocromador en lugar del fotormultiplicador. Por ejemplo, usando una cámara web (sin la lente de enfoque) para una determinada posición de la red de difracción, ha sido posible obtener la imagen izquierda de la Fig. 10 de una lámpara de bajo consumo en tan sólo unos segundos de adquisición de datos. Cuando esta imagen se integra y se calibra frente a la longitud de onda, el resultado obtenido constituye una región específica del espectro de emisión de la lámpara (comparar las figuras 8 y 10 en el rango espectral de 576-596 nm).

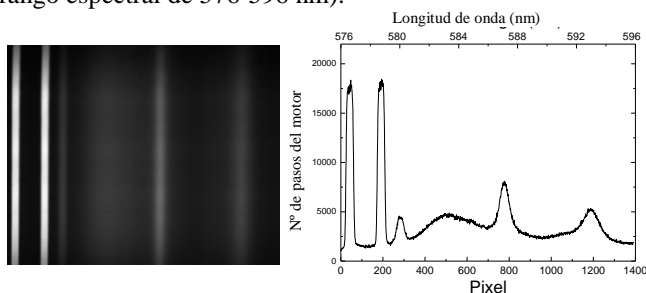


Fig. 8. Izda: Imagen obtenida con un CCD de la salida del monocromador utilizando una CFL. Dcha: Integración de la imagen (TOP) y calibración en función de la longitud de onda.

VII. CONCLUSIONES

En este trabajo, se ha presentado el diseño de un monocromador de bajo costo para propósitos educativos. El instrumento propuesto se basa en la estructura de un telescopio, donde se han fabricado varias piezas mecánicas

con la ayuda de un torno, aunque muchas otras fueron recicladas de dispositivos obsoletos, tales como ordenadores e impresoras.

Se diseñó una placa electrónica para comandar el motor paso a paso con el fin de controlar la posición de la red de difracción (elemento clave del monocromador), y para la adquisición de los datos así como para permitir la comunicación con el ordenador, donde se instaló y programó la interfaz gráfica de usuario.

Por último, el *software* desarrollado proporciona una interacción sencilla e intuitiva con el monocromador, haciendo de todo el sistema una herramienta completa y útil para medir los espectros ópticos con una alta precisión en las actividades de investigación, así como para promover el aprendizaje de los estudiantes en técnicas experimentales relacionados con la Óptica. Las principales características del monocromador diseñado se resumen en la Tabla I.

Parámetros	Valor
Resolución	0,5 nm
Repetitividad	0,2 nm
Relación señal a ruido	85 dB
Resolución del ADC	5 mV
Dispersión de salida	3 nm/mm

Tabla 1. Características del monocromador diseñado

El precio final del prototipo, que fue desarrollado en su mayoría con materiales reciclados, fue de 917 € (aproximadamente 1280 dólares). Este precio es alrededor de cuarenta veces más barato que los monocromadores comerciales. Actualmente, el monocromador se encuentra en un laboratorio de espectroscopia láser y de altas presiones y se utiliza principalmente para la enseñanza; una CCD ha sido acoplada a la salida del mismo para acelerar la adquisición de los espectros tal y como se ha especificado en el apartado anterior.

AGRADECIMIENTOS

La presentación de este trabajo ha sido posible gracias al Programa de Apoyo a la Investigación de la Universidad de La Laguna para el año 2014 (B.O.C. n° 44 del 5 de marzo de 2014, referencia del procedimiento SUBCCC006).

REFERENCIAS

- [1] E. Hetch, *Optics*, Pearson Education, 2008.
- [2] Isaac Newton: adventurer in thought, by Alfred Rupert Hall, page 67.
- [3] Morris H. Shamos, *Great Experiments in Physics*, pp. 96-101, Holt, Rinehart and Winston, New York, 1959.
- [4] Microchip Technology Inc. Website: <http://www.microchip.com>
- [5] <http://www.rhoent.com/pic16xx.pdf>, "1977 Data Catalog", Micro Electronics, General Instrument Corporation, 1977.
- [6] J. Travis, *LabVIEW for everyone*, Prentice Hall PTR, 3rd ed., Upper Saddle River, New Jersey, 2007.
- [7] National Instruments LabVIEW home page: <http://www.ni.com/labview>
- [8] Lexman Website: <http://www.lexman-light.com>
- [9] Horiba monochromator Triax 180: <http://www.horiba.com/scientific/products/optical-spectroscopy/spectrometers-monochromators/triax/triax-180-202/>