

Desarrollo de un Espectrómetro de Bajo Costo con una Rejilla Ajustable y Control Electrónico Inalámbrico

Terceros Iván¹; Ormachea Omar¹; Urquidi Oscar¹; Villazón Alex²

¹Centro de Investigaciones Ópticas y Energías (CIOE), Universidad Privada Boliviana, Cochabamba, Bolivia

²Centro de Investigaciones en Nuevas Tecnologías Informáticas (CINTI), Universidad Privada Boliviana, Cochabamba, Bolivia

Resumen: Se presenta la implementación de un sistema mecánico que permite el posicionamiento angular de la rejilla de difracción de un espectrómetro óptico permitiendo ampliar su rango espectral. Se desarrollaron los circuitos electrónicos para un micro-servomotor controlado por un microcontrolador. Este microcontrolador PIC interactúa con un módulo bluetooth (HC-06) que permite la comunicación inalámbrica hacia el software de control instalado en una computadora portátil. Para el desarrollo del espectrómetro, se utilizaron elementos ópticos comerciales de bajo costo y para su posicionamiento se diseñaron y construyeron piezas en una impresora 3D. Además se utilizaron objetivos de cámaras fotográficas comerciales “CANON”, una rejilla de difracción en reflexión de 1200 l/mm y como sensor óptico una cámara Chameleon monocromática CCD de 1.2 MP. El software desarrollado, permite la adquisición y procesamiento en tiempo real de datos del espectrómetro, calibración y control inalámbrico del posicionamiento del micro-servomotor con una resolución de 0.3nm. El espectrómetro fue desarrollado para su uso en sistemas LIBS y fue validado comparando espectros referenciales de bases de datos oficiales del NIST Atomic Spectra Database y de OSCAR Delaware State University, con los datos obtenidos por el espectrómetro en esta aplicación

Palabras clave: Control electrónico inalámbrico, Bluetooth, piezas en 3D, Espectroscopia de emisión atómica, LIBS, Láseres.

Development of a Low Cost Spectrometer with Adjustable Grid and Wireless Electronic Control

Abstract: We present the implementation of a mechanical system which enables angular positioning of the diffraction grating of an optical spectrometer to extend its spectral range. An electronic circuit for a micro-servo motor controlled by a microcontroller was developed. This PIC microcontroller interacts with a Bluetooth module (HC-06) that allows wireless communication with the control software installed on a laptop. For the development of the spectrometer, low cost optical materials were used and for positioning were designed and built pieces in a 3D printer. Furthermore we used the objectives of CANON commercial cameras, a diffraction grating of 1200 l/mm, and as optical sensor a Chameleon monochromatic CCD camera of 1.2 MP for this system. The software developed for this application allows acquisition and processing of real-time data from the spectrometer, and also the calibration and control of the wireless positioning of the micro-servo motor with a resolution of 0.3nm. The spectrometer was developed to be used with LIBS systems and was validated by comparing reference spectra from the official databases NIST Atomic Spectra Database and OSCAR (Delaware State University), with the data obtained by the spectrometer in this application.

Keywords: Wireless electronic Control, Bluetooth, atomic emission spectroscopy, LIBS, lasers.

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la espectroscopia viene desarrollándose desde el año 1800, cuando científicos habían relacionado la emisión de luz en colores particulares con ciertos elementos químicos, a este proceso se le llamó espectroscopia química, en el cual los colores o longitudes eran una firma única de cada átomo e ion. (Cremers y Radziemski, 2006).

Un espectrómetro es un dispositivo óptico que descompone la luz policromática en sus distintas componentes monocromáticas y las distribuye de manera que puedan ser analizadas en forma de un espectro en función de longitudes de onda. Una vez calibrado el espectrómetro puede brindar información cualitativa sobre la longitud de onda e intensidad de cualquier fuente luminosa. (Ormachea y Urquidi, 2012).

La tecnología LIBS (Laser Induced Breakdown Spectroscopy), se refiere a la espectroscopia de emisión atómica (de chispa) inducida por radiación laser de alta

oormachea@upb.edu.

potencia, técnica muy efectiva para el análisis elemental en tiempo real para una gran variedad de materiales. (Cremers y Radziemski, 2006). La luz emitida por el plasma es luego analizada en un espectrómetro para la identificación y cuantificación de los elementos químicos (Tognoni, Palleschi, Corsi y Cristoforetti, 2002).

En la espectroscopia de emisión atómica inducida por radiación laser, como fuente coherente de alta intensidad se utiliza comúnmente láseres pulsados del tipo YAG:Nd⁺⁺⁺, en el modo de Q-switch activo.

Para implementar esta técnica son necesarios los siguientes componentes: un láser pulsado y un espectrómetro con características de gama espectral amplia, alta sensibilidad, velocidad de respuesta rápida y detector de tiempo de acceso controlado, adicionalmente se requiere de un software que pueda analizar e interpretar los datos obtenidos en tiempo real.

En Bolivia, la Universidad Privada Boliviana (UPB) desde el 2012 ha venido trabajando en el desarrollo y construcción de espectrómetros ópticos de bajo costo, para su implementación en sistemas LIBS (Ormachea, 2007) (Ormachea, 2007) (Ormachea y Delgado, 2011) (Ormachea y Urquidi, 2012) (Urquidi y Ormachea, 2013) (Ormachea, Urquidi, Cisneros, 2013) (Ormachea, Urquidi, Cazasola, 2013).

Actualmente se cuenta con una línea de investigación en el área mencionada, donde trabajan de manera multidisciplinaria el Centro de Investigaciones Ópticas & Energías y el Centro de Investigaciones en Nuevas Tecnologías Informáticas de la UPB.

La tarea principal descrita en el presente trabajo, es el desarrollo de la parte mecánica de posicionamiento del sistema óptico, donde se utilizó una impresora 3D para la construcción de las piezas de sujeción, la automatización del manejo del espectrómetro y el control inalámbrico del posicionamiento de la rejilla de difracción.

2. ESPECTROMETRO

2.1 Espectrómetro Clásico

La configuración clásica de un espectrómetro está compuesta por: una rendija de entrada, un lente colimador, un elemento dispersor (rejilla de difracción) y un objetivo. En la actualidad el ocular del telescopio es un sensor CCD o CMOS para obtener una imagen digitalizada de los espectros obtenidos, el conjunto del sensor y objetivo desempeñan el papel de una cámara digital (James, 2007).

Actualmente se reemplaza al prisma con una rejilla de difracción (comúnmente, de reflexión) como elemento dispersor. En la Figura 1 se muestra la configuración óptica de un espectrómetro clásico usando una rejilla de difracción por reflexión.

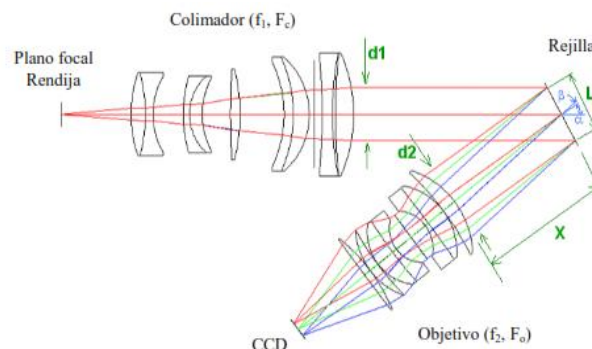


Figura 1. Configuración Óptica de un espectrómetro Clásico con rejilla de difracción en reflexión.

2.2 Parámetros Básicos y Diseño óptico

Para el diseño del espectrómetro se identificaron parámetros característicos, los principales son: la resolución, el ancho espectral, los ángulos de incidencia y de difracción, además de las características constructivas del sistema limitadas por las propiedades físicas y por el costo.

2.2.1 Rendija Ajustable

La rendija ajustable permite el control entre la luminosidad y la resolución (James, 2007), es necesario tener cierta precisión mecánica, en ese sentido, la rendija se basa en el mecanismo de avance de un micrómetro convencional de bajo costo que permite esta regulación (Figura 2).

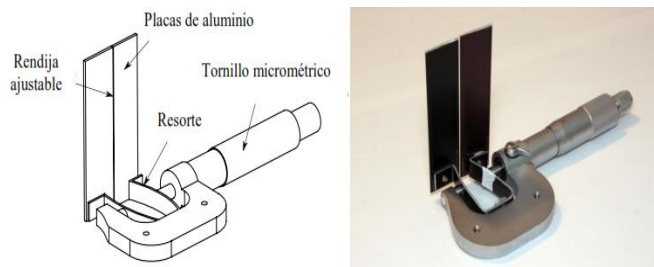


Figura 2. Rendija ajustable desarrollada basada en un micrómetro de bajo costo.

2.2.2 Objetivo de cámara y Lente Colimadora

Se utilizó un objetivo estándar canon de 50 mm (Figura 3), con una relación focal baja de 1.4 que permite la formación de la imagen en el área del detector (Cámara CCD). La resolución espectral es aproximadamente 0.3 nm. y para su cálculo se utilizaron los ángulos de incidencia y difracción establecidos por las características constructivas del sistema (Ormachea y Urquidi, 2012). La lente de colimación permite direccionar los haces divergentes que se originan en el plano de la rendija del espectrómetro proyectándolos paralelamente en la rejilla de difracción.

Como lente colimadora se seleccionó un objetivo fotográfico canon de 135 mm (Figura 4) de distancia focal 2.8 de relación focal. Este elemento óptico fue elegido por tener una distancia focal mayor a la del objetivo de la cámara, con una

relación focal baja que permite cubrir toda el área de la rejilla de difracción de 25x25mm.



Figura 3. Objetivo de 50 mm.



Figura 4. Objetivo de 135 mm

2.2.3 Elemento Detector

Como elemento detector se escogió una cámara CCD Chameleon (Figura 5) de marca Point Grey Research (PointGrey, n.d). Esta cámara tiene un sensor monocromático de alta sensibilidad, tamaño reducido, conectividad USB y permite la integración con un trigger externo, característica importante para aplicaciones LIBS que permite la obtención de un espectro por disparo laser.



Figura 5. Cámara Monocromática CCD Chameleon

La curva de respuesta espectral se muestra en la Figura 6, donde presenta buena sensibilidad en el rango de 400-850nm (PointGrey, n.d).

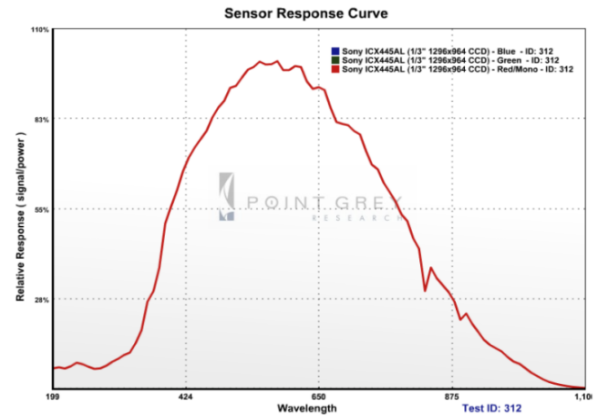


Figura 6. Curva de respuesta espectral sensor CCD cámara Monocromática

2.2.4 Rejilla de Difracción

La rejilla de difracción en reflexión seleccionada cuenta con 1200 líneas por milímetro y tamaño de 25x25mm (Figura 7).

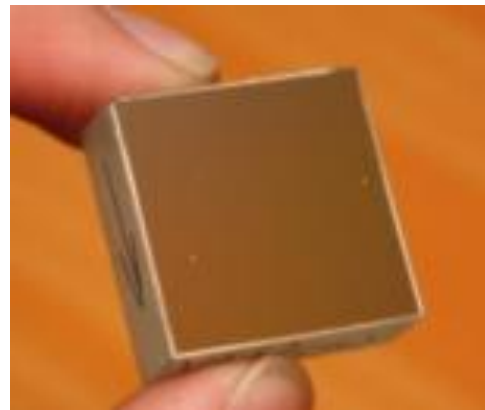


Figura 7. Rejilla de Difracción en reflexión 1200 l/mm

3. TECNOLOGÍA INALÁMBRICA BLUETOOTH

Bluetooth es una tecnología inalámbrica de ondas de radio de corto alcance cuyo objetivo es simplificar las comunicaciones entre dispositivos informáticos, además de simplificar la sincronización de datos entre los dispositivos de comunicación y ordenadores.

El dispositivo está compuesto por una antena bi-direccional (transceiver) que trabaja a una frecuencia de 2.4 GHz, permite enlaces punto a punto con un alcance de unos 10 metros (Johnson, 2004). Los dispositivos que incorporan esta tecnología se reconocen entre si y utilizan el mismo lenguaje, adicionalmente durante la transferencia de datos, el canal de comunicaciones permanece abierto y no requiere la intervención directa del usuario cada vez que se desea transferir voz o datos de un dispositivo a otro, llegando a un ancho de banda máximo durante la transferencia de 700 kbps (Pottie y Kaiser, 2000).

Este tipo de tecnología (Bluetooth), por las características principales de bajo consumo energético, tamaño muy pequeño y control de fácil integración, se convierte en una herramienta ideal para la interconexión inalámbrica entre el software del computador y el sistema de control mecatrónico

de la rejilla de difracción, que está gobernada por un microcontrolador (Figura 8). Para que el microcontrolador pueda comunicarse con el dispositivo se requiere de un puerto serial de comunicación entre los cuales se intercambian datos mediante instrucciones predefinidas (Bensky, 2004).

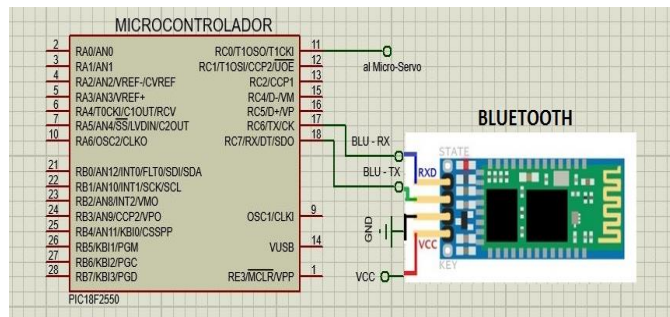


Figura 8. Esquema de conexión entre el módulo BluetoothHC-06 y el micro-controlador PIC18F2550

En el desarrollo del sistema de control inalámbrico, se utilizó el dispositivo Bluetooth HC-06, el cual tiene un tamaño compacto (4,3 X 1,6 X 0,7 cm), un peso de 8gr, voltaje de operación de 3,3 - 6 V, 150 mA de consumo de corriente eléctrica y un alcance de hasta 9,14 m. Este dispositivo está operado por un micro-controlador PIC18f2550.

En la Figura 8 se muestra la interconexión entre el micro-controlador y el modulo Bluetooth, donde se observa además los pines específicos usados entre el micro-controlador: PIN 17 referente al PIN de recepción (TX) y PIN 18 referente al PIN de transmisión (RX). Internamente el micro-controlador usa comandos SERIALES predefinidos en la programación, que permiten el intercambio de datos hacia el módulo bluetooth que posteriormente serán transmitidos desde el HC-06 hacia cualquier dispositivo de recepción con otro módulo bluetooth (PC, Tablets y celulares), en nuestro caso hacia la PC. En la Figura 9 se muestra físicamente el dispositivo bluetooth y el microcontrolador.



Figura 9. Módulo Bluetooth HC-06 y Circuito electrónico de control.

4. DESARROLLO MECANICO Y AUTOMATIZACION DEL ESPECTROMETRO

4.1 Servomotor

Los servos son un tipo especial de motor DC, que se caracterizan por su capacidad para posicionarse de forma inmediata en cualquier posición dentro de su intervalo de operación. Para ello, el servomotor espera un tren de pulsos (PWM) que se corresponde con el movimiento a realizar.

Están generalmente formados por un amplificador, un motor, un sistema reductor formado por engranes y un circuito de realimentación, todo en un misma caja de pequeñas dimensiones. El resultado es un servo de posición con un margen de operación de 180° y algunos modelos hasta 360° aproximadamente. Las señales de control PWM del servomotor se muestran en la Figura 10.

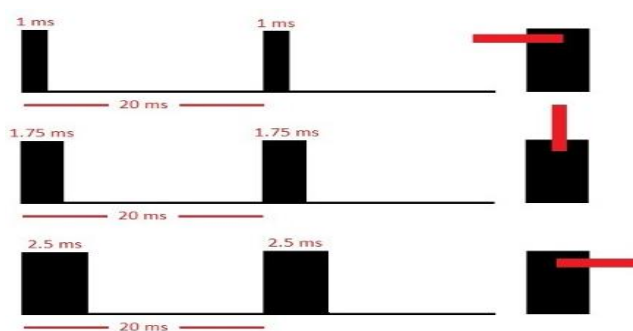


Figura 10. Señales de control de posición (ángulos) por pulsos PWM.

4.2 Sistema de Rotación

El sistema de rotación y posicionamiento de la rejilla de difracción está compuesto por un servomotor gobernado por el microcontrolador PIC18F2550 interconectado con el módulo bluetooth.

Este circuito en conjunto permite el enlace con el software de la computadora para realizar un posicionamiento selectivo. Se definió 4 posiciones de la rejilla de difracción, cada una con un ancho espectral aproximado de 70nm. Cubriendo en rango de $\Delta\lambda = 400-660\text{nm}$. La Figura 11 muestra la interconexión del microcontrolador con el micro-servomotor.

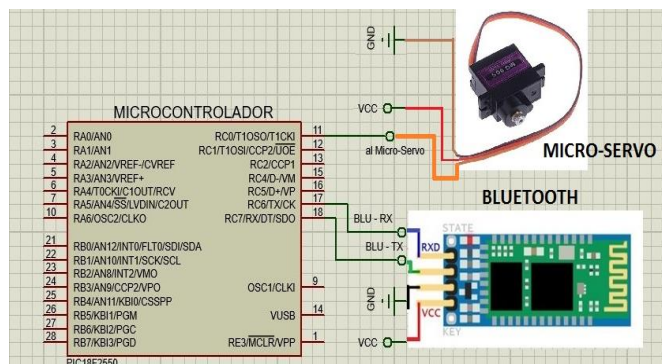


Figura 11. Interconexión micro-servomotor, bluetooth y microcontrolador PIC18f2550.

4.3 Posicionamiento del Sistema Óptico

Para el posicionamiento y sujeción de la cámara CCD con su correspondiente objetivo, la lente de colimación y la rejilla de difracción se desarrollaron piezas en una impresora 3D. Estos diseños son relativamente fáciles de realizar y su construcción es de bajo costo y toman tiempos relativamente cortos, permitiendo un acoplamiento relativamente preciso. En la Figura 12, se muestra la pieza que permite la sujeción y rotación de la rejilla de difracción, además que esta posiciona adecuadamente el plano del patrón de difracción, de la rejilla, en el eje de rotación del micro-servomotor. En las Figura 13a y 13b se muestra las piezas desarrolladas para la cámara y objetivo; y en la figura 14a y 14b las piezas 3D para la sujeción de la lente colimadora. Ambos diseños impresos en plástico del tipo PLA de 1.75 mm, estas piezas permitieron un alineamiento simétrico del sistema óptico.

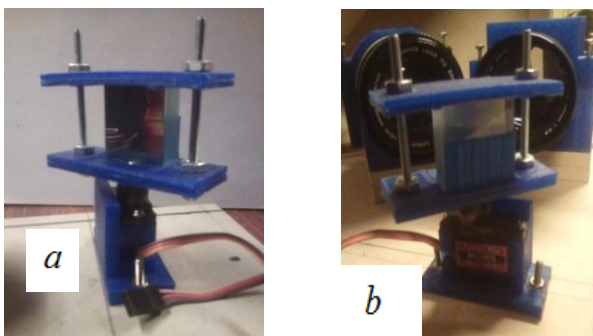


Figura 12. Pieza en 3D para el acoplamiento entre el servo y la rejilla de difracción, vista frontal (a) y posterior (b).



Figura 13. Base de sujeción objetivo 50mm y Cámara CCD, vista lateral (a) y vista frontal (b).

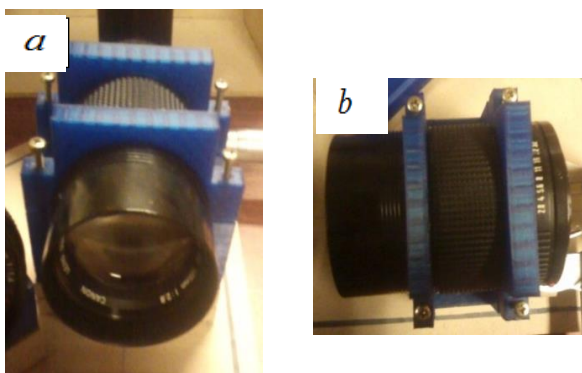


Figura 14. Base de sujeción objetivo 135mm, vista frontal (a), vista superior (b).

4.4 Ensamblado del prototipo

Se diseñó y desarrollo el corpus del espectrómetro en madera aglomerada, conforme a las especificaciones experimentales del sistema óptico obtenido. Para la precisión se realizó el corte y grabado usando una Maquina CNC.

En la Figura 15 se muestra el ensamblado y posicionamiento de la rendija de entrada, objetivo, lente colimadora y rejilla de difracción siguiendo el esquema del sistema óptico propuesto (Ormachea y Urquidi, 2012), la Figura 16 muestra la presentación en vista superior del espectrómetro y la Figura 17 muestra todos los componentes del espectrómetro incluyendo el módulo de control de rotación de la rejilla de difracción.



Figura 15. Ensamblado y posicionamiento de los elementos del espectrómetro prototipo



Figura 16. Tapa superior



Figura 17. Vista superior interna del sistema óptico y sistema de control movimiento de la rejilla

5. SOFTWARE DE ANÁLISIS

El software de análisis se desarrolló en lenguaje C++, utilizando librerías y métodos eficientes de análisis de imágenes que permitieron procesar las fotografías capturadas por la cámara CCD.

Se desarrolló una interfaz gráfica (Figura 18) que permite al usuario ver en tiempo real la cámara CCD, calibrar el rango de espectro que se está observando, realizar capturas automáticas de fotografías en la cuales se muestran espectros visibles, enviar comandos de control para el posicionamiento en ventanas de la rejilla y seleccionar los elementos químicos de interés para que se realice una búsqueda puntual.

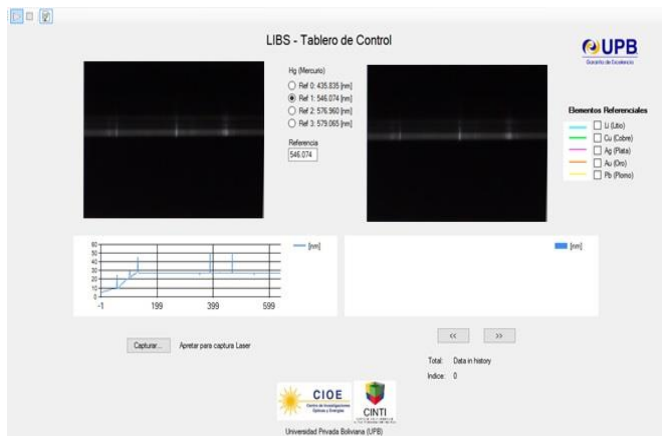


Figura 18. Interfaz gráfica software desarrollado de análisis y procesamiento de datos.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 19 muestra el espectro de una moneda boliviana de cobre, la luz producida por ablación láser es recogida, procesada por el espectrómetro y analizada con el programa desarrollado, finalmente se realiza la validación del espectro obtenido comparándolo con la base de datos del Optical Science Center for Applied Research (OSCAR) para este elemento atómico.

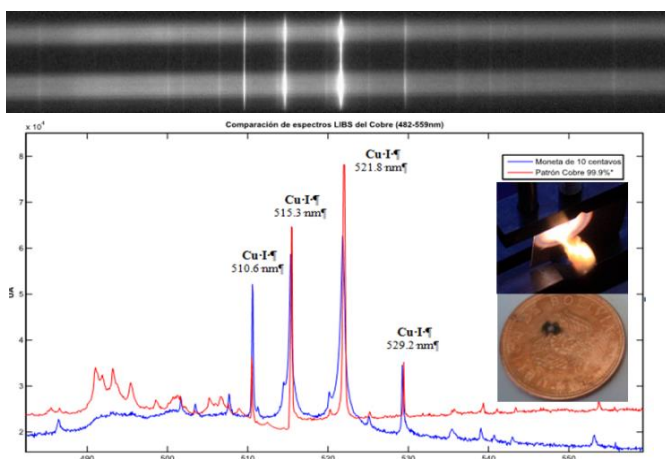


Figura 19. Comparación de espectros LIBS patrón (curva roja) y del cobre de una moneda boliviana de 10 centavos (curva azul), en la región 482-559 nm.

En la Figura 20 se muestra el espectro obtenido de una muestra de plomo. En la parte superior se observa la

fotografía tal como ve la señal la cámara CCD en la parte inferior la imagen procesada y su espectro correspondiente.

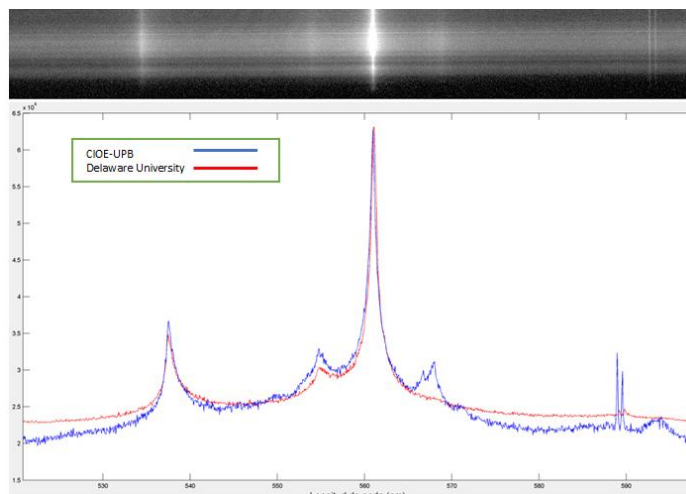


Figura 20. Fotografía del espectro del Pb vista por la cámara CCD y comparación de espectros LIBS obtenidos con el prototipo y un espectro patrón.

7. CONCLUSIONES

Se diseñó, desarrollo y construyó un espectrómetro de bajo costo, con rejilla de difracción ajustable y control electrónico inalámbrico.

Para el posicionamiento de los elementos ópticos se desarrolló piezas en una impresora 3D, el cual permitió mantener un eje óptico uniforme, el ajuste y posicionamiento de los diferentes elementos ópticos con bastante precisión.

El Software desarrollado permite la adquisición, procesamiento y análisis de los datos adquiridos, adicionalmente el control inalámbrico del sistema de movimiento de la rejilla de difracción.

Se Realizó la validación en el software con bases de datos del Optical Science Center for Applied Research (OSCAR Delaware State University) con los datos obtenidos por el espectrómetro en esta aplicación.

Finalmente, este elemento ópto-macánico de medición, por las características de diseño, resolución espectral control del movimiento de la rejilla de difracción, hacen que sea un elemento de bajo costo apropiado para integrarlo en sistemas LIBS.nales.

REFERENCIAS

Bensky, A. (2004). Short-range Wireless Communication, Fundamentals of RF System Design and Application. Newnes.

Cremers, A.D. and Radziemski, J.L. (2006). Handbook of Laser-Induced Breakdown Spectroscopy. John Wiley & Sons.

James, J. (2007). Spectrograph Design Fundamentals. Cambridge: University Press.

Johnson, D. (2004). Hardware and software implications of creating Bluetooth Scatternet devices. In: Proceedings of the IEEE AFRICON 2004. 1, 211-215.

Ormachea, O. (2007). Diseño y construcción de un prototipo funcional de generación óptica cuántica (laser). Investigación & Desarrollo, 7, 71-82.

Ormachea, O. (2007). Diseño y construcción de un láser solido pulsado del tipo YAG:Nd+++ Revista Boliviana de Física, 13, 54-57.

Ormachea, O. y Delgado, M. (2011). Diseño y construcción de un láser pulsado portátil del tipo YAG:Nd+++ para aplicaciones LIBS. Investigación & Desarrollo, 11, 85-97.

Ormachea, O. y Urquidi, O. (2012) Desarrollo de un espectrómetro de difracción para aplicaciones LIBS. Investigación & Desarrollo, 12, 5-13.

Ormachea, O., Urquidi, O. and Cisneros, J. (2013). Desarrollo de un sistema de análisis fisicoquímico, basado en espectroscopia de emisión atómica inducida por radiación láser. Investigación & Desarrollo, 13, 2013 pp. 5-12.

Ormachea, O., Urquidi, O. and Cazasola, D. (2013). Development of a portable, low-cost LIBS system. Proc. of SPIE, In:8th Iberoamerican Optics Meeting and 11th Latin American Meeting on Optics, Lasers and Applications.

Pottie, G. J., Kaiser, E. (2000). Wireless Integrated Network Sensors - WINS. Communications of the ACM., 51-58.

PointGrey, (n.d). Chameleon Technical Reference Manual. Obtenido de: <https://www.ptgrey.com/chameleon-usb2-cameras>. (Diciembre, 2015).

Tognoni, E., Pallechi, V., Corsi, M. and Cristoforetti, G. (2002). Quantitative micro-analysis by laser-induced breakdown spectroscopy: a review of the experimental approaches. Spectrochimica Acta Part B, 57, 1115-1130.

Urquidi, O. and Ormachea, O. (2013). Desarrollo de un espectrómetro de difracción y su programa de control utilizando elementos comerciales de bajo costo. Revista Cubana de Física, 30(2), 93-98.