

CONTROL INALÁMBRICO DE UN SISTEMA LIBS PORTÁTIL BASADO EN TECNOLOGÍA BLUETOOTH

A BLUETOOTH-BASED WIRELESS CONTROL OF A PORTABLE LIBS SYSTEM

Iván Terceros y Omar Ormachea

Centro de Investigaciones Ópticas y Energías (CIOE)

Universidad Privada Boliviana

oormachea@upb.edu

(Recibido el 10 noviembre 2014, aceptado para publicación el 20 de noviembre 2014)

RESUMEN

Se presenta el desarrollo de un sistema de control inalámbrico, basado en tecnología *bluetooth*, para un sistema LIBS (*Laser-Induced Breakdown Spectroscopy*) que utiliza un prototipo láser Nd:YAG⁺⁺⁺ portátil de una potencia estimada de 10 MW/cm², un espectrómetro de difracción de 0.27 nm de resolución y 76.9 nm de ancho espectral (prototipos construidos y desarrollados en el CIOE). Se optimizaron los circuitos electrónicos de control, potencia, fuente y batería del láser, obteniendo un menor tamaño y peso para el sistema LIBS. Se instalaron todos los componentes electrónicos en placas impresas generadas en una máquina de Control Numérico por Computadora TK-CNC. El sistema es capaz de funcionar tanto con una batería del tipo LiPo (*Lithium Polymer*) como con la red convencional de energía eléctrica. Se diseñó y construyó un primer prototipo de una pistola de medición compuesta del cabezal laser, un sistema de sincronización electrónica entre el láser y el sensor del espectrómetro (*trigger*) y un sistema óptico para la recolección de la luz de la muestra ablacionada por radiación. El sistema inalámbrico permite controlar al láser portátil desde un computador, haciendo posible el cambio de parámetros de funcionamiento del láser tales como la frecuencia, la energía de disparo y la toma sincronizada de datos del espectrómetro. El sistema completo que consta de un láser pulsado, un espectrómetro y el sistema de recolección de luz; tiene un peso relativamente bajo (aproximadamente 6kg) y un costo menor en un 30% de sistemas similares portátiles.

ABSTRACT

We describe the development of a Bluetooth-based wireless control for a LIBS (*Laser-induced Breakdown Spectroscopy*) system that uses a portable prototype Nd:YAG⁺⁺⁺ laser with an estimated power of 10MW/cm², a spectrometer with 0.27nm of diffraction resolution and 76.9nm of spectral width. All the prototypes were developed and built in our research institute, the CIOE. We optimized the electronic control circuits, the power supply and the laser battery, thus enabling the reduction in size and weight of the LIBS system. All electronic components were installed on printed circuit boards that were generated on a computer numerical control machine TK-CNC. The system is able to operate with a LIPO (*Lithium Polymer*) battery as well as with the conventional power grid. We designed and built a first prototype of a measurement gun composed of the laser head, an electronic synchronization system between the laser and the spectrometer sensor (*trigger*) and an optical data input system for collecting light of radiation-ablated samples. The wireless system allows controlling the portable laser from a computer, enabling to apply changes on the laser operating parameters such as frequency, spark energy and synchronized data capture from the spectrometer. The full system consists of a pulsed laser, a spectrometer and a light collection system; it has a relative low weight (about 6Kg) and is 30% cheaper than similar portable systems.

Palabras Clave: Control Electrónico Inalámbrico, Bluetooth, Espectroscopia de Emisión Atómica, LIBS, Láseres.

Keywords: Wireless Electronic Control, Bluetooth, Atomic Emission Spectroscopy, LIBS, Lasers.

1. INTRODUCCIÓN

LIBS (*Laser Induced Breakdown Spectroscopy*), por sus siglas en inglés, se refiere a la espectroscopía de emisión atómica inducida por radiación láser [1]. Ésta es una técnica muy poderosa para el análisis en tiempo real de la composición atómica de una gran variedad de materiales, desde metales y muestras geoquímicas hasta agentes biológicos [2], [3], [4], [5], [6].

Tognoni, et al. [7] concluyen que con esta técnica no se necesita una preparación previa de la muestra y la sensibilidad de detección puede llegar hasta partes por millón (ppm). El funcionamiento de este sistema consiste en un pulso láser de alta intensidad el cual es focalizado hacia la muestra a analizar, posicionada de unos pocos centímetros a un metro de la muestra. Un pulso láser de unos 10 nanosegundos de tiempo de vida es suficiente para poder excitar a la muestra. Cuando se dispara el láser, la alta temperatura del pulso concentrado produce plasma. A medida que el plasma se enfría (~1.0 μ sec después del disparo láser), los átomos excitados en el plasma emiten luz, con longitudes de onda particulares que distinguen a cada elemento atómico [1]. Todos los elementos de la tabla periódica emiten en la región 200-980 nm.

En Bolivia, la Universidad Privada Boliviana (UPB) ha venido trabajando desde el año 2007 en el desarrollo de láseres pulsados [8], [9], llegando a desarrollar un prototipo láser portátil destinado a aplicaciones LIBS [10]. Se implementó adicionalmente una línea de desarrollo y construcción de espectrómetros ópticos para su implementación en los sistemas mencionados [11], [12]. Actualmente, existe una línea de investigación sobre sistemas LIBS en el Centro de Investigaciones Ópticas y Energías (CIOE) de la UPB [13], [14], siendo este trabajo parte de dicha línea de investigación y el primer esfuerzo por desarrollar un sistema LIBS en Bolivia.

El desarrollo de los prototipos mencionados en el CIOE, ha dado resultados muy interesantes y con buenas expectativas para introducir esta tecnología y metodología de análisis al área de la minería boliviana. La tarea principal emprendida, es el desarrollo de un sistema LIBS completamente portátil y autónomo desde el punto de vista energético, el cual pueda ser controlado de manera inalámbrica para facilitar su operación. En la Figura 1 se puede observar una representación foto-realista del diseño conceptual del sistema LIBS portátil propuesto y de su modo de uso. Este tipo de disposición del sistema puede ser muy útil cuando es necesario realizar trabajos de campo en áreas como la minería y geoquímica.



Figura 1 – Diseño conceptual de un sistema LIBS portátil.

En el diseño conceptual se muestra como componentes a la fuente de alimentación electrónica del láser portátil, el espectrómetro de amplio espectro, la pistola de medición compuesta del cabezal láser y el sistema óptico para la recolección de la luz de la muestra ablacionada por radiación láser. Se observa igualmente un *netbook* para el control del láser y la sincronización del sistema de toma de datos ópticos a través de tecnología inalámbrica *bluetooth*.

2. TECNOLOGÍA INALÁMBRICA BLUETOOTH

La tecnología inalámbrica *Bluetooth* es una tecnología de ondas de radio de corto alcance cuyo objetivo es simplificar las comunicaciones entre dispositivos informáticos e Internet. También pretende simplificar la sincronización de datos entre los dispositivos de comunicación y ordenadores.

Trabaja en dos capas del modelo OSI que son la de enlace y la de aplicación, incluye un antena bi-direccional (transeiver) que transmite y recibe a una frecuencia de 2.4 GHz. Según Johnson, D. [15] las conexiones que se realizan son de uno a uno con un rango máximo de 10 metros, para incrementar la distancia se utilizan repetidores que permiten alcanzar una distancia de hasta 100 metros. Bluetooth, por cuestiones de seguridad, cuenta con mecanismos de encriptación de 64 bits y autenticación para controlar la conexión y evitar que otros dispositivos puedan acceder a los datos o realizar modificaciones. El transmisor está integrado en un pequeño microchip generalmente de 9 X 9 mm y opera en una frecuencia de banda global. Los dispositivos que incorporan esta tecnología se reconocen entre sí y utilizan el mismo lenguaje, de la misma forma que lo realizan otros dispositivos como lo son la computadora y la impresora. 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. El ancho de banda máximo que se alcanza durante la transferencia es de 700 kbps y consume un 97% menos que un teléfono móvil [16].

Existen otros dispositivos pequeños que podrían realizar la misma comunicación inalámbrica como es la tecnología Zigbee, dispositivo que está desarrollado para aplicaciones en domótica, donde el sistema pasa la mayor parte del tiempo dormido, esto permite un ahorro considerable de la batería [17]. Sin embargo, *Bluetooth* está diseñado para estar constantemente intercambiando datos, a mayores anchos de banda que el Zigbee, adicionalmente, los módulos comerciales Bluetooth llegan a costar hasta 5 veces menos que los módulos de Zigbee.

Este tipo de tecnología (Bluetooth), por las características mencionadas de bajo consumo energético y tamaño muy pequeño, se convierte en una herramienta ideal para la interconexión inalámbrica entre el computador y la fuente de alimentación del láser, que está gobernada por un micro-controlador electrónico. Para que el micro-controlador pueda comunicarse con el dispositivo se requiere de un puerto serial de comunicación entre los cuales se intercambian datos mediante instrucciones predefinidas [18].

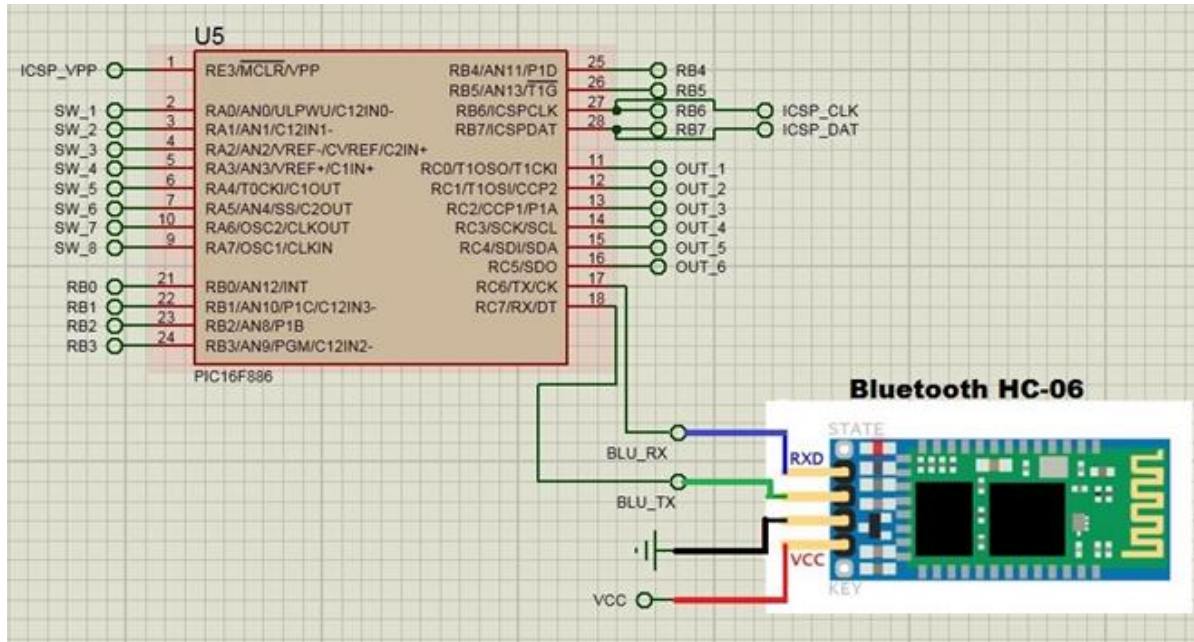


Figura 2 – Esquema de conexión entre el módulo BluetoothHC-06 y el micro-controlador PIC16f886.

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 PIC16f886, En la Figura 2 se muestra la interconexión entre el micro-controlador y el módulo *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.

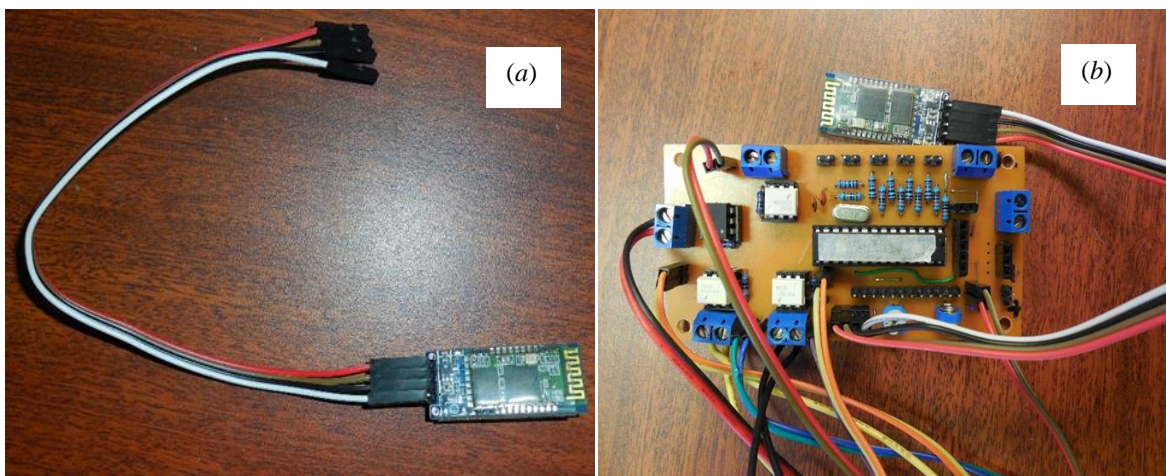


Figura 3 – Módulo *Bluetooth* HC-06 (a), Circuito electrónico de control (b).

En la Figura 3a se muestra el módulo *Bluetooth* HC-06 con sus pines de interconexión para el micro-controlador con la siguiente asignación de colores: Blanco: Alimentación 5V, Negro: GND, Café: Pin de TX del HC-06, Rojo: Pin de RX del HC-06. En la Figura 3b se muestra la conexión entre el módulo y el circuito completo de control electrónico.

3. DESARROLLO Y OPTIMIZACIÓN DEL LÁSER PORTATIL

En la Figura 4 se muestra un esquema de los bloques importantes que se desarrollaron y optimizaron. En este bloque se observa la secuencia de alimentación a través de baterías, el sistema inversor que convierte la corriente DC a AC. Se observa el bloque de control basado en un micro-controlador PIC 16F886, el bloque de comunicación inalámbrica basada en tecnología *Bluetooth*, el bloque de sincronización de disparo del láser con el sensor del espectrómetro y, finalmente, el cabezal láser. A continuación se tiene una descripción detallada de cada uno de los elementos que conforman este esquema de bloques.

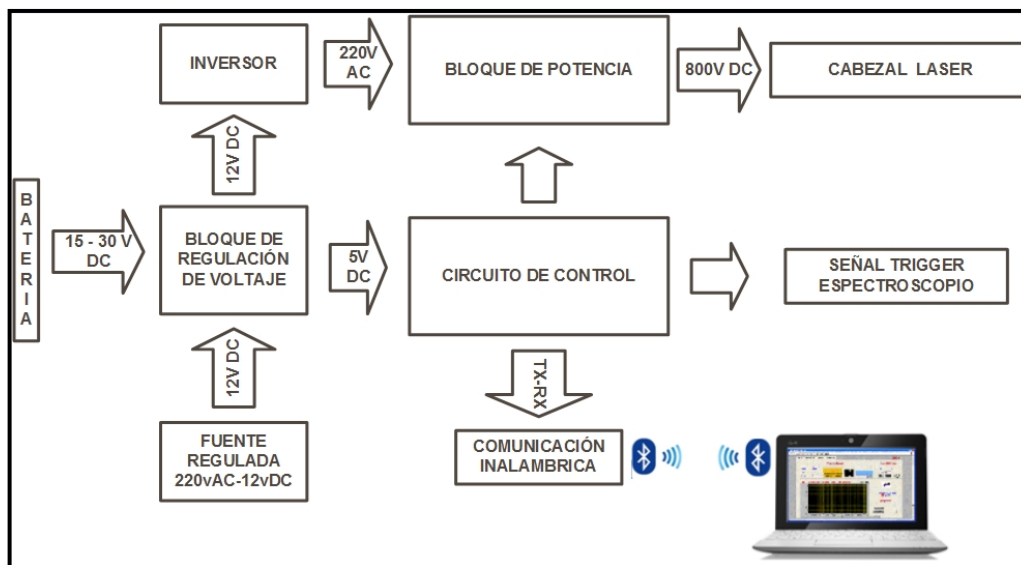


Figura 4 – Esquema de bloques del sistema láser.

3.1 Sistema de alimentación eléctrica

El sistema de alimentación eléctrica fue modificado de tal manera que se puede utilizar una batería o la red eléctrica convencional a través de una fuente regulada estabilizada que entrega 12 VDC.

Para la alimentación del sistema autónoma se utilizó una batería de Polímero de Litio de 18.5V y una corriente de 3300mAh, estas baterías son muy comerciales y es necesario un estuche de protección para evitar accidentes en la manipulación.

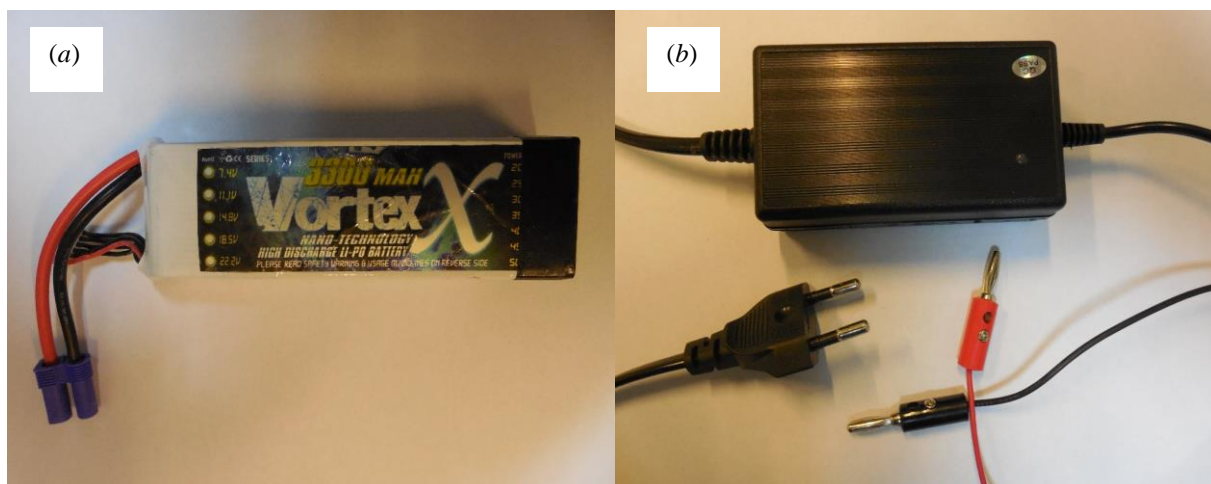


Figura 5 – Batería del tipo LIPO a) y cargador de batería b).

Las características principales de este tipo de baterías son su excelente velocidad de descarga alta, extra-baja impedancia interna, baja auto descarga, largo ciclo de vida y poco efecto memoria, y pueden recargarse en cualquier momento sin disminuir su capacidad.

3.2 Bloque de regulación de voltaje

El voltaje máximo entregado por la batería es de 21 V y es necesario un circuito regulador de voltaje para la entrada al inversor que admite un máximo de 15V de entrada. El circuito elegido es un convertor DC-DC *Step Down* mostrado en la Figura 6a. Este convertor posee las siguientes características de funcionamiento: Un voltaje de entrada: 5-35V; voltaje de salida: ajustable de forma continua a partir de 1,25 V a 30V; una corriente nominal de salida de 3A; una corriente máxima de salida de 4A (más de 15 W, de preferencia con un disipador de calor) y una eficiencia de conversión del 96%.

Se utilizaron 2 convertidores DC-DC, uno para convertir el voltaje de la batería a 12V y otro para convertir el voltaje de alimentación (sea una batería o una fuente de 12V) a 5V necesario para la alimentación de los bloques de control, comunicación inalámbrica y *Trigger* (Figura 6b).

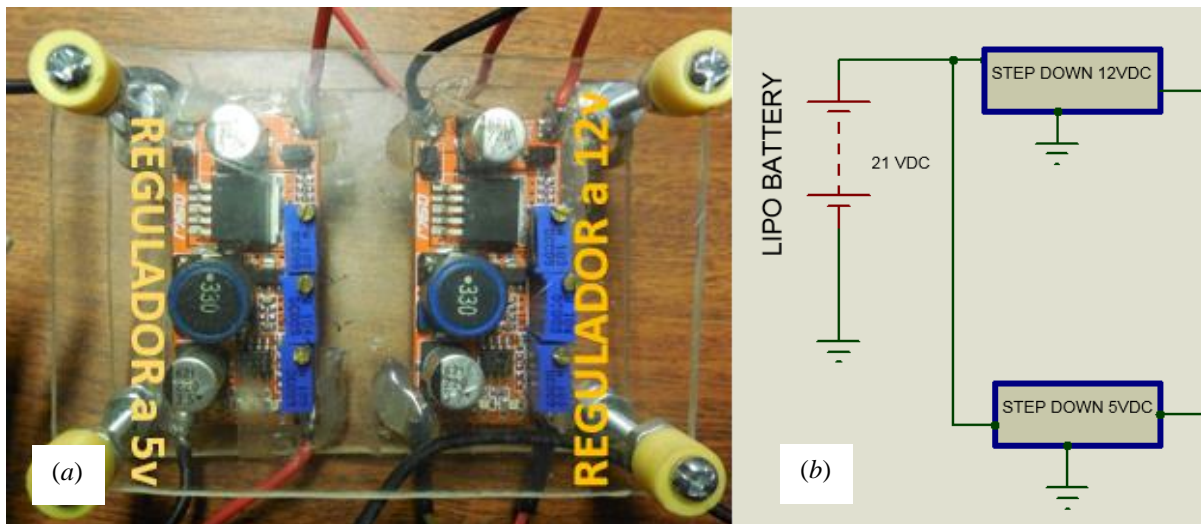


Figura 6 – Convertidores DC-DC Step Down (a), esquema del bloque de regulación (b).

3.3 El inversor y bloque de potencia

Se utilizó un inversor comercial de 12VDC a 220VAC con una potencia nominal de 150W (Figura 7a), obteniendo con estos parámetros el tiempo de carga mínimo de los capacitores de potencia en 4 segundos. Este elemento cuenta con un sistema propio de termorregulación que activa su sistema de ventilación para su enfriamiento continuo.

El bloque de potencia está conformado por un arreglo de 8 condensadores con parámetros de voltaje de 800 VDC y una capacitancia de 55 μf . Se verificó experimentalmente que el arreglo de condensadores después de cada disparo tiene un remanente de carga aproximada de 150V, es por esto que se realizó un circuito impreso donde se agregó un banco de 8 resistencias en paralelo de 1k Ω -1W conectado a un *switch* de conmutación, que permite realizar la descarga de los condensadores manualmente (Figura 7b) para prevenir descargas eléctricas por accidente cuando se requiera dar mantenimiento al sistema.

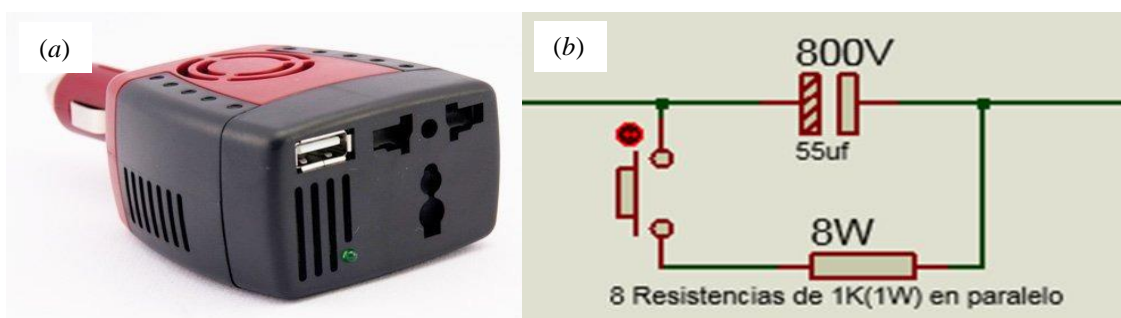


Figura 7 – Inversor comercial 12 VDC a 220 VAC (a), esquema del bloque de potencia (b).

En todos los casos, se realizaron los diseños de los circuitos impresos con el programa EAGLE y, posteriormente, se materializó el diseño de los circuitos (PCB) con la utilización de una máquina de Control Numérico por Computadora TK-CNC.

El circuito final del bloque de potencia junto con las conexiones al *Trigger* (Láser) y láser se muestran en la Figura 8. Los puntos a-b y c-d son puntos de interconexión a opto-acopladores que permiten el control y sincronización de carga y disparo láser.

3.4 Circuito de control

Para el bloque de control, se utilizó el microcontrolador 16f886, que presenta buenas características de funcionamiento lógico suficientes para la aplicación del sistema. Se integró un opto-transistor que permite el control y sincronización del *Trigger* con la cámara CCD del espectrómetro.

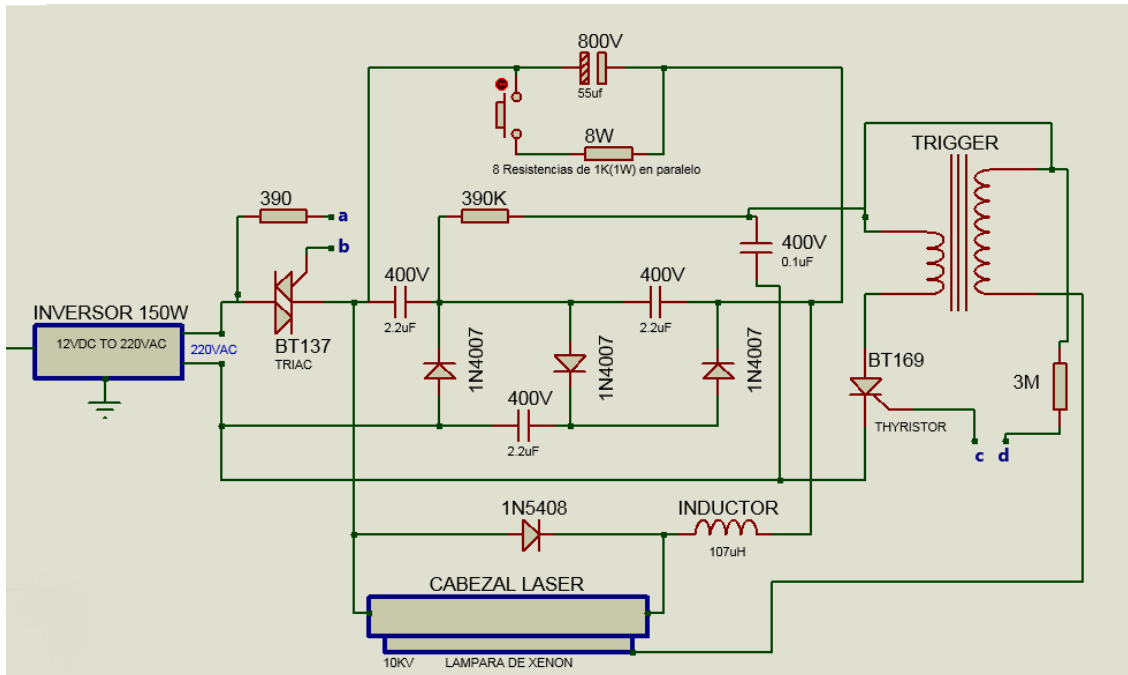


Figura 8 – Circuito electrónico del bloque de potencia.

En la Figura 9 se muestra el esquema electrónico del bloque de control.

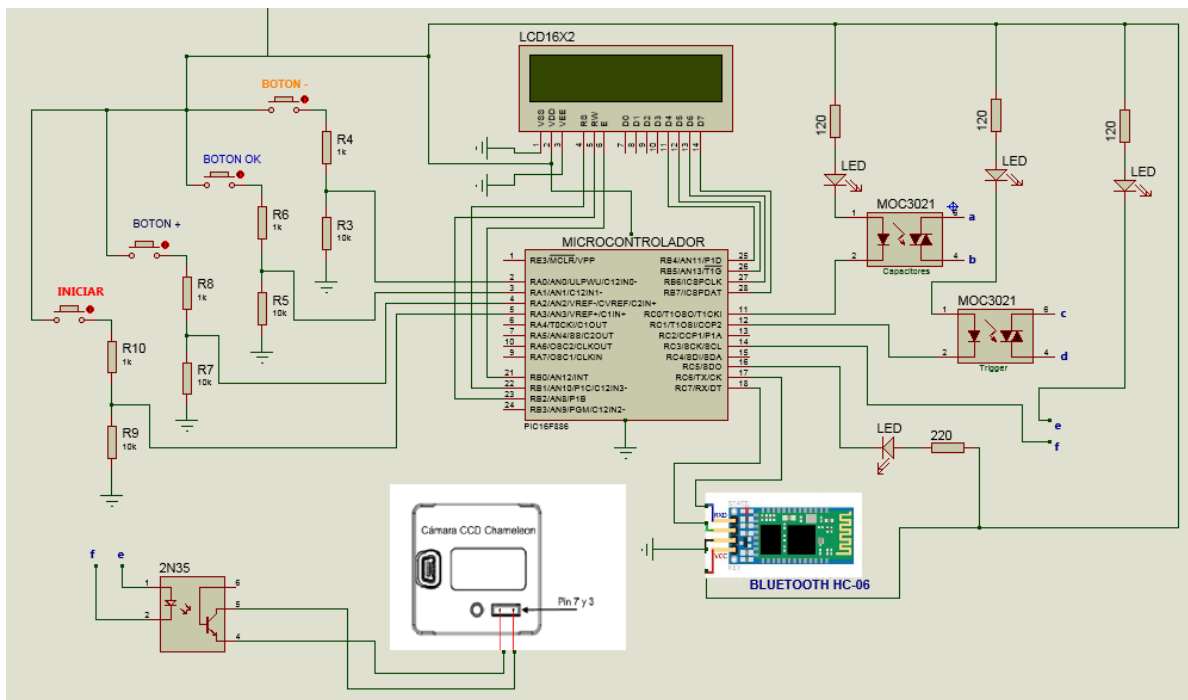


Figura 9 – Diagrama Electrónico del Bloque de Control.

Se habilitó un puerto de comunicaciones serial tanto físico como lógico para poder hacer uso de un módulo *bluetooth* (HC-06) que permitirá el control inalámbrico por computadora del sistema. Se implementaron 5 botones (*switches*) de control para el usuario, permitiendo así un manejo más versátil y práctico del sistema. Adicionalmente, se implementaron LEDs indicadores que permiten tener información visual del proceso y comprobar el funcionamiento correcto del circuito de control. El circuito de la Figura 9 muestra en sus puntos e-f las conexiones que permiten el control y sincronización del *trigger* de la cámara CCD que forma parte del espectrómetro [14].

4. DESARROLLO Y DISEÑO DE LA PISTOLA DE MEDICIÓN

Uno de los elementos de gran importancia en un sistema LIBS portátil es la pistola de medición. Para éste, se realizó un diseño que consta del cabezal láser, el *Trigger* y un sistema óptico de recolección de luz. En el montaje del sistema se adaptó una plataforma de perfil de aluminio como base de sujeción para el cabezal laser y una lente focalizadora para la concentración de la radiación láser en la muestra, Figura 10a. Adicionalmente, se aisló el *Trigger* dentro del perfil de aluminio debido a que en este elemento se tiene voltajes altos en su salida, los valores son de 220 V en su entrada y 10 kV en su salida.

El sistema óptico de recolección de la señal está conformado por un objetivo de cuarzo unido a una fibra óptica, la cual envía la señal al espectrómetro [14], Figura 10b.

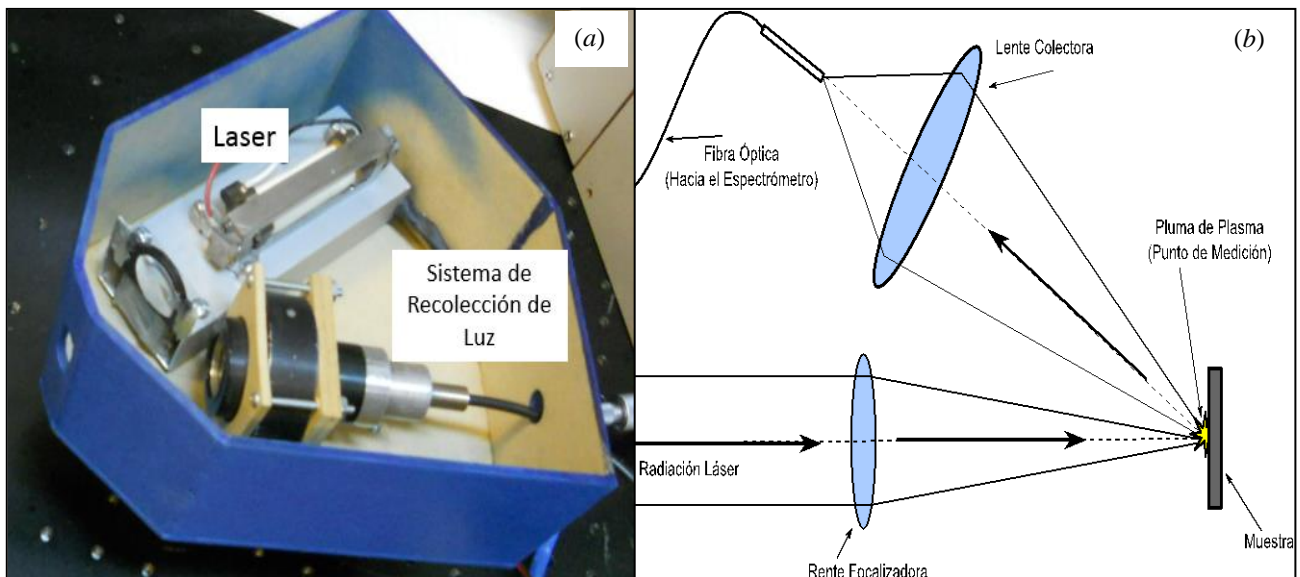


Figura 10 – Pistola de medición (a) Configuración elegida para la el disparo y recolección de la luz (b).

La configuración construida permite acercar fácilmente a la pistola de medición las muestras a analizar, sin una metodología especial de alineamiento de las mismas. El sistema de control del *trigger* (CCD) del espectrómetro permite poder capturar una fotografía con la cámara CCD sincronizada con el disparo del láser, de tal manera que se obtiene una fotografía por cada disparo láser. Mediante software es posible manipular la señal del *Trigger* (CCD) para poder configurar el tiempo de exposición para captar toda la señal óptica en la fotografía. Posteriormente, la fotografía es analizada por un software de procesamiento de imágenes para poder obtener los espectros de emisión de las muestras a analizar (Figura 11).

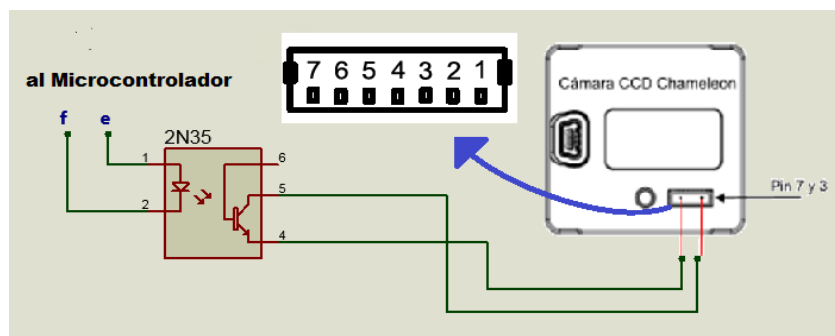


Figura 11 – Esquema de Interconexión al *Trigger* de la cámara CCD.

5. PROTOTIPO FUNCIONAL DE UN SISTEMA LIBS PORTÁTIL

En el sistema LIBS desarrollado (Figura 12), se utilizó un láser de alta potencia Nd:YAG ⁺⁺⁺ portátil, que fue previamente desarrollado en el CIOE, el cual fue modificado y optimizado para su aplicación en este tipo de sistemas, la intensidad estimada de emisión a una longitud de onda de $\lambda=1,064 \mu\text{m}$ es de 10 MW/cm^2 . Se diseñó y construyó una pistola de medición, dentro de la cual se encuentra el láser propiamente dicho y un sistema de recolección de luz. También se utilizó un espectrómetro desarrollado en el CIOE, de 0.27 nm de resolución y 76.9 nm de ancho espectral. La rejilla de difracción está montada en un sistema mecánico de sujeción móvil, lo cual permite realizar un escaneo en todo el espectro visible, la rejilla de difracción utilizada en el espectrómetro es de 1200 líneas/mm (Urquidi, O. and Ormachea, O. [11]). El sistema también cuenta con un circuito de coordinación entre el láser y el espectrómetro, además de contar con un módulo inalámbrico para poder operar el sistema a distancia.

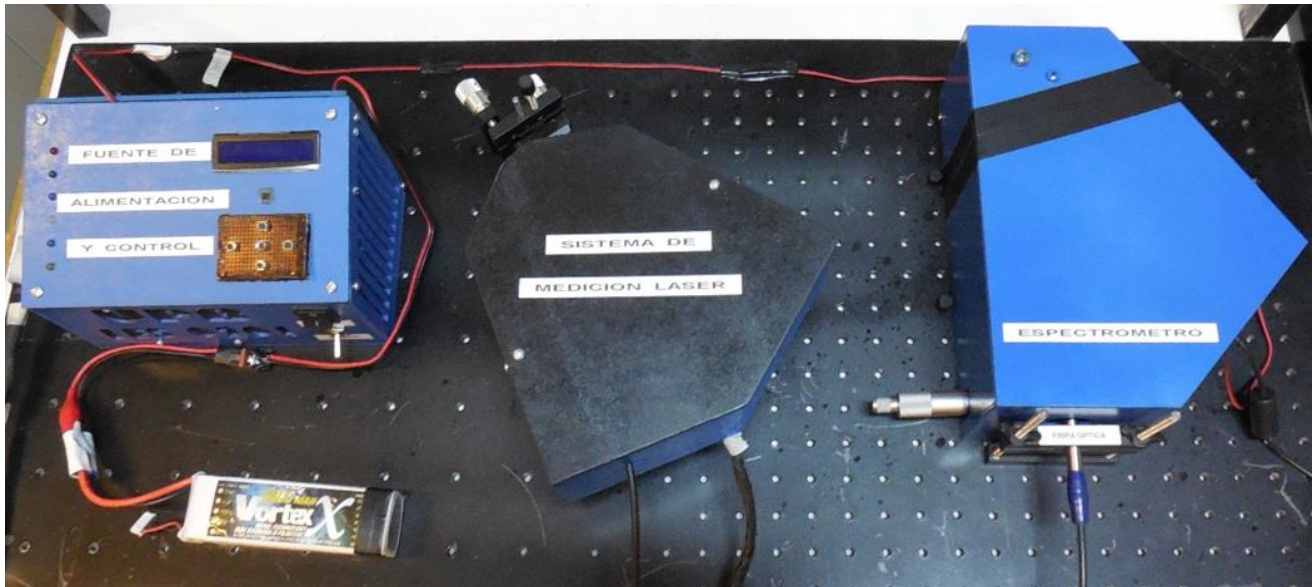


Figura 12 – Montaje del sistema LIBS portátil.

El sistema tiene un peso de aproximadamente 6 kg , haciendo de este dispositivo una herramienta ideal de campo para la identificación de elementos atómicos *in situ* y en tiempo real. La autonomía del sistema con el uso de la batería de polímero de litio se estima en unos 1000 pulsos.

En la Figura 12 se presenta la fuente de alimentación y control del dispositivo, la batería de polímero de litio, la pistola de medición que está compuesta por el láser y el sistema de recolección de luz, el espectrómetro y la fibra óptica por la cual se lleva la señal óptica desde la pistola de medición hasta el espectrómetro.

6. RESULTADOS PRELIMINARES

El uso de un *Trigger* (CCD) que controla el momento de captura de datos en la cámara CCD del espectrómetro, permite obtener una fotografía de la señal óptica en cada disparo láser, este sistema permite controlar el tiempo de exposición de la cámara garantizando que toda la señal óptica sea captada por el sensor del espectrómetro.

En la Figura 13 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 (Figura 13a) en la parte inferior la imagen procesada en Matlab y el espectro correspondiente (Figura 13b).

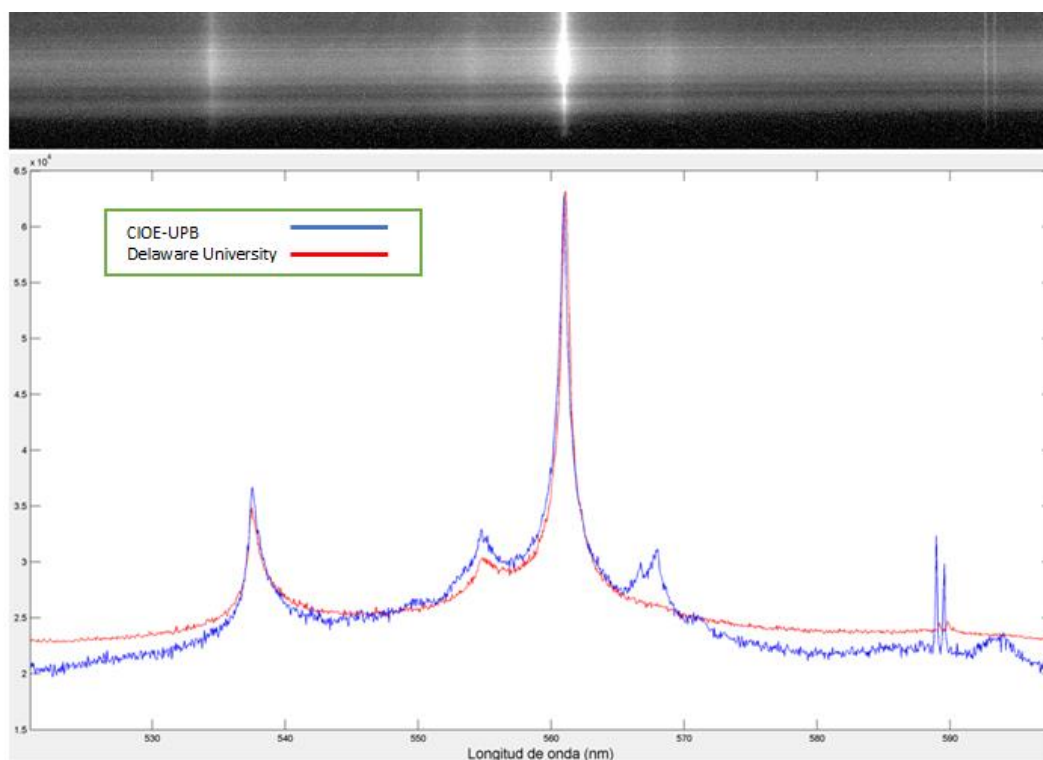


Figura 13 – Fotografía del espectro del Pb vista por la cámara CCD (a), comparación de espectros LIBS obtenidos con el prototipo y un espectro patrón (b).

7. CONCLUSIONES

Se desarrolló un sistema LIBS basado en un espectrómetro y un láser YAG:Nd⁺⁺⁺ portátil previamente desarrollados en el Centro de Investigaciones Ópticas y Energías. Se optimizaron los parámetros de potencia y de control, se instalaron todos los componentes electrónicos en placas impresas generadas en una máquina de Control Numérico por Computadora TK-CNC.

Se implementó como posibles fuentes alternativas de energía una batería del tipo LIPO y la red convencional de energía eléctrica.

Se desarrolló un sistema inalámbrico basado en tecnología *bluetooth*, que permite controlar al láser portátil desde un computador, haciendo posible el cambio de parámetros de funcionamiento del láser como la frecuencia, energía de disparo, entre otros, y la toma sincronizada de datos del espectrómetro.

Se diseñó y construyó una pistola de medición compuesta por el cabezal láser y un sistema de recolección de la señal óptica. El posicionamiento de la muestra a analizar no requiere de una metodología especial, haciendo el manejo de este dispositivo muy simple.

Por último, el costo de este dispositivo, gracias al desarrollo propio, es mucho menor que equipos comerciales de este tipo. Este sistema demostró tener potencial para convertirse en una herramienta de análisis fisicoquímico cualitativo de bajo costo, con aplicación directa en el área minera y capacidad de expansión hacia otros ramos que necesiten equipos de análisis físico-químico como parte de sus procesos.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] David, A., Cremers, Radziemski, L. J. *Handbook of Laser-Induced Breakdown Spectroscopy*. John Wiley & Sons, 2006
- [2] Hybl, J. D., Lithgow, A. G., and Buckley, G. S. Laser-induced breakdown spectroscopy detection and classification of biological aerosols. *Appl. Spectrosc.*, **57**, 2003, pp. 1207–1215.
- [3] Whitehouse, A. I., Young, Botheroyd, Lawson, Evans, & Wright Remote material analysis of nuclear power station steam generator tubes by laser-induced breakdown spectroscopy. *Spectrochimica Acta Part B*, **56**, 2001, pp. 821–830.
- [4] Alvira, C. F., D Orzi, O. J. and Bilmes, M. G. Surface Treatment Analyses of Car Bearings by Using Laser-Induced Breakdown Spectroscopy. *Applied Spectroscopy*, **6**(2), 2009, pp. 192-198.

- [5] Rull, P. F. Nuevas Fronteras en Mineralogía y Geoquímica de Campo. *Revista de la sociedad española de mineralogía*, **13**, 2010, pp. 189-190.
- [6] Russell, R. S. Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) – an emerging field-portable sensor technology for real-time, in-situ geochemical and environmental analysis. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, **5**, 2005, pp. 21-28.
- [7] Tognoni, E., Palleschi, V., Corsi, M., and Cristoforetti, G. Quantitative micro-analysis by laser-induced breakdown spectroscopy: a review of the experimental approaches. *Spectrochimica Acta Part B*, **57**, 2002, pp. 1115–1130.
- [8] Ormachea, O. Diseño y construcción de un prototipo funcional de generación óptica cuántica (Láser). *Investigación & Desarrollo*, **7**, 2007, pp. 71-81.
- [9] Ormachea, O. Diseño y construcción de un láser sólido pulsado del tipo YAG:Nd⁺⁺⁺. *Revista Boliviana de Física*, **13**, 2007, pp. 54-57.
- [10] Ormachea, O. and Delgado, M. Diseño y construcción de un láser pulsado portátil del tipo YAG:Nd⁺⁺⁺ para aplicaciones LIBS. *Investigación & Desarrollo*, **11**, 2011, pp. 85-97.
- [11] Ormachea, O. and Urquidí, O. Desarrollo de un espectrómetro de difracción para aplicaciones LIBS. *Investigación & Desarrollo*, **12**, 2012, pp. 5-13.
- [12] Urquidí, O. and Ormachea, O. Desarrollo de un espectrómetro de difracción y su programa de control utilizando elementos comerciales de bajo costo. *Revista Cubana de Física*, **30(2)**, 2013, pp. 93-98.
- [13] Ormachea, O., Urquidí, O. and Cisneros, J. Desarrollo de un sistema de análisis fisicoquímico, basado en espectroscopia de emisión atómica inducida por radiación láser. *Investigación & Desarrollo*, **13**, 2013 pp. 5-12.
- [14] Ormachea, O., Urquidí, O. and Cazasola, D. 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, 87851D*. **8785**, 2013.
- [15] Johnson, D. Hardware and software implications of creating Bluetooth Scatternet devices. *In: Proceedings of the IEEE AFRICON 2004*. **1**, 2004, pp. 211-215.
- [16] Pottie, G. J. and Kaiser, E. Wireless Integrated Network Sensors - WINS. *Communications of the ACM.*, 2000, pp. 51–58.
- [17] Caprile, S., and Equisbí, R. *Desarrollo de aplicaciones con comunicación remota basadas en módulos ZigBee y 802.15.4*. GAE, 2009.
- [18] Bensky, A. *Short-range Wireless Communication, Fundamentals of RF System Design and Application*. Newnes, 2004.