

DESARROLLO DE UN SISTEMA FOTOACÚSTICO PARA LA DETERMINACIÓN DE COEFICIENTES DE ABSORCIÓN ÓPTICOS

DEVELOPMENT OF A PHOTOACOUSTIC SYSTEM FOR THE DETERMINATION OF OPTICAL ABSORPTION COEFFICIENTS

R. DÍAZ FUENTES^{a,b}, S. STOLIK^{b†}, A. VALOR^b Y J.M. DE LA ROSA^b

a) Programa de Doctorado en Comunicaciones y Electrónica, ESIME Culhuacán, Instituto Politécnico Nacional, México.

b) Laboratorio de Biofotónica, ESIME Zacatenco, Instituto Politécnico Nacional, México; sstolik@ipn.mx[†]

† autor para la correspondencia

Recibido 9/03/2020; Aceptado 20/10/2020

PACS: Optical Absorption coefficient (coeficiente de absorción óptico), 78.20.Ci; absorption spectra of solids and liquids (espectro de absorción de sólidos y líquidos), 78.40.-q; photoacoustic effect (efecto fotoacústico), *43.35.Ud, 78.20.Pa.

Una de las propiedades más importantes a tener en cuenta en las terapias y diagnósticos médicos basados en la interacción de la luz con los tejidos es la absorción óptica de estos medios porque solo la luz absorbida es capaz de producir cambios físicos, químicos o fisiológicos en el tejido [1]. Además, el espectro de absorción de una molécula dada es una huella de su presencia en un tejido. Sin embargo, determinar el coeficiente de absorción en medios turbios con métodos ópticos constituye un desafío dada la dificultad de distinguir inequívocamente si la disminución del flujo radiante se debe a la absorción o es producida por el esparcimiento. Una solución viable podría ser el uso del efecto fotoacústico debido a que este depende únicamente de la energía radiante absorbida en el medio [2]. En 1880 el efecto fotoacústico fue descubierto por el científico Alexander Graham Bell. Más de 90 años después, se desarrolló el modelo teórico de Rosencwaig y Gersho que describió dicho efecto [3]. Al ser este un fenómeno que depende también de las propiedades térmicas del material estudiado [4], esta técnica se ha utilizado para la caracterización térmica de materiales [5].

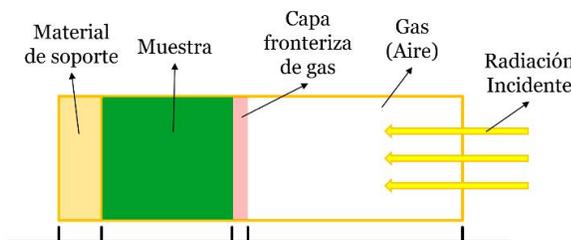


Figura 1. Esquema representativo del efecto fotoacústico en una celda cerrada.

En la técnica fotoacústica, se utiliza una celda cerrada, dentro de la cual se encuentra el material que se va a investigar (Fig. 1). En la muestra ocurre la absorción de radiación óptica incidente modulada; produciendo el calentamiento periódico de la muestra. A continuación, las capas de gas más cercanas a la muestra se calientan con la misma frecuencia. El calentamiento de esta sección del gas produce su expansión, y su posterior enfriamiento, una contracción. Así, la capa

gaseosa vecina a la muestra actúa como un pistón sobre el resto del gas y genera una onda de presión que puede ser detectada con un micrófono.

El sistema fotoacústico se presenta en la Fig. 2 y cuenta con tres partes fundamentales: el módulo donde se encuentran los láseres, el módulo electrónico donde se encuentran el modulador, el demodulador y los demás circuitos requeridos para el correcto funcionamiento del sistema y un módulo externo con la celda fotoacústica y una computadora.

Para la medición de la señal fotoacústica se escogió un micrófono de tipo electreto. La celda fotoacústica, en la cual se encuentra el micrófono con su circuito preamplificador, es un módulo externo al sistema de medición, el cual se encuentra conectado al sistema mediante un cable coaxial SMA. La celda fotoacústica tiene dos orificios: uno superior por donde se deposita la muestra y por donde incide la luz a través de una ventana de cuarzo, y uno lateral donde se ubica el micrófono. En la Fig. 3 se muestra la celda fotoacústica desarrollada, junto al circuito de preamplificación y su circuito de alimentación externo.

Como fuentes de excitación del sistema fotoacústico se utilizan diodos láseres de diferentes longitudes de onda de 405, 450, 520, 532, 638, 658, 784 y 980 nm. Se diseñó un controlador de láseres que funciona como una fuente de corriente controlada por voltaje. Debido a la necesidad de controlar varios diodos láseres diferentes, se decidió fabricar los controladores de tipo modular, lo que permite su intercambio si se decidiera usar nuevos láseres, independientemente de los parámetros eléctricos que estos tengan.

En la Fig. 4 se muestra un esquema del sistema óptico desarrollado para el direccionamiento del haz de luz del láser seleccionado hacia la muestra. Todos los láseres están montados sobre una base circular apuntando hacia el centro, donde se encuentra un prisma triangular acoplado a un motor de pasos que con su rotación permite seleccionar el láser que se desea utilizar. Para controlar el punto de referencia se implementó un sistema optoelectrónico de posición.

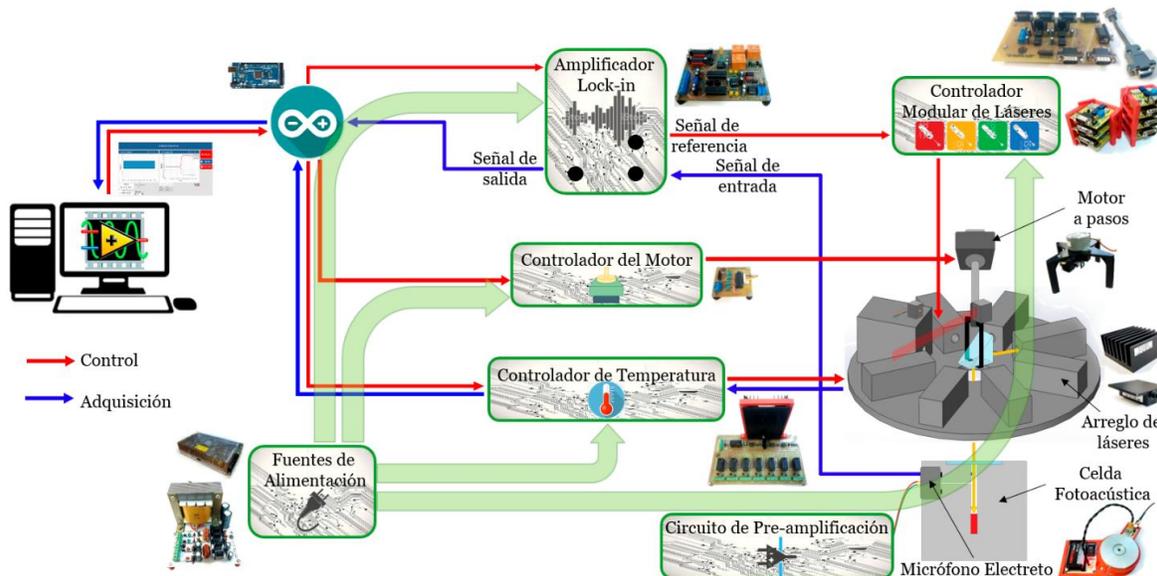


Figura 2. Diagrama en Bloques del Sistema Fotoacústico.

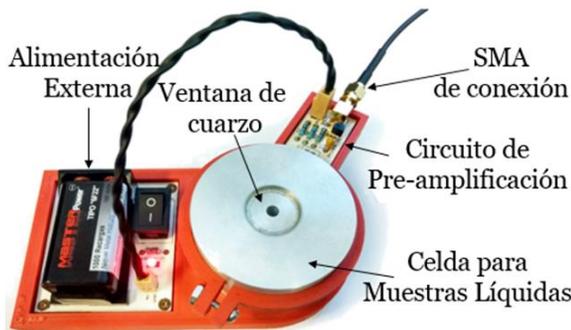


Figura 3. Celda fotoacústica desarrollada.

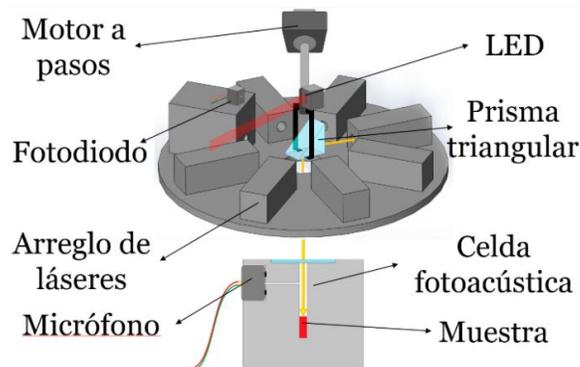


Figura 4. Esquema del sistema óptico.

Una parte muy importante en este sistema es el bloque modulador y demodulador, encargado de modular la luz incidente sobre la muestra en la celda fotoacústica y de demodular la señal acústica detectada a través de un esquema de detección sincrónica de doble fase [6]. Esto permitió la sustitución de un amplificador Lock-In comercial para la medición de la señal fotoacústica en fase (canal X) y en cuadratura (canal Y). Esto permitirá reconstruir la señal fotoacústica obteniendo tanto su amplitud como el cambio de fase respecto a la señal de referencia incidente. Tomando en cuenta que el aumento de la temperatura afecta el funcionamiento de los diodos láser, se desarrolló un control PID que permite sensar y controlar la temperatura de cada uno de los láseres individualmente. La temperatura de los láseres es mantenida haciendo uso de disipadores y de celdas Peltier, como puede verse en la Fig. 5, en su parte superior izquierda.

Se desarrolló una interfaz en la plataforma LabView 2016 que permite la comunicación LabView-Arduino. Este último fue programado para centralizar el control de todo el sistema y se comunica con una computadora donde se visualiza la interfaz de usuario y se almacenan los datos de las mediciones. El usuario es capaz de establecer todos los parámetros del experimento a realizar y visualizar y guardar la información adquirida.

Se diseñó un gabinete con acrílico de 5 mm de espesor que contiene todos los módulos (Fig. 5). Sus dimensiones son $81 \times 45 \times 20$ cm.



Figura 5. Vista frontal e interna del gabinete.

Para la realización de mediciones preliminares se utilizaron cilindros plásticos en forma de pastillas. Los cilindros son de 4 mm de diámetro y 2.2 mm de altura y se imprimieron con plástico ABS en colores transparente, blanco, azul, rojo

y negro. El experimento consistió en medir las señales fotoacústicas producida con cada una de estas pastillas y por la celda vacía con los diferentes láseres con frecuencias de modulación de 30, 100, 500, 1000 y 2000 Hz. En la Fig. 6 se muestran las gráficas correspondientes a la amplitud de la señal fotoacústica en cada uno de los canales (X y Y) dependiendo de la longitud de onda obtenidas con la pastilla negra y la pastilla blanca. Se aprecia que existen diferencias en el comportamiento de las señales fotoacústicas, las cuales son producidas por el cambio de muestra, de láser o de frecuencia de modulación de los láseres. Este resultado corrobora que el sistema es sensible a estos cambios. Como es de esperar, el gráfico correspondiente a la pastilla negra es el que tiene mayores valores de amplitud de la señal fotoacústica.

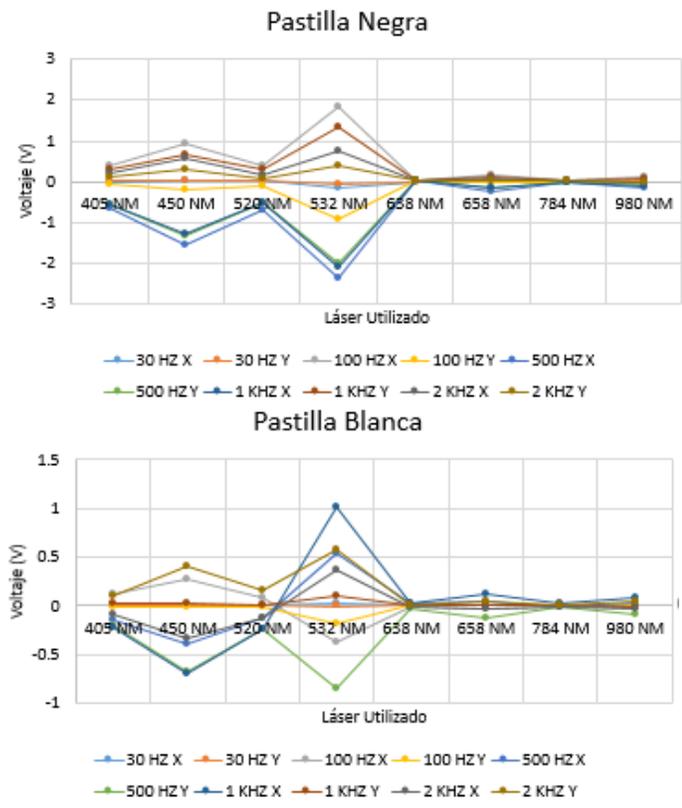


Figura 6. Mediciones para las pastillas negra y blanca.

La Fig. 7 resume los resultados de la medición de la amplitud de la señal fotoacústica en los canales en fase y cuadratura (X y Y) para los láseres de 450, 532 y 658 nm. Con la revisión de estas gráficas se distingue cómo existe un patrón entre ellas que se corresponde a que todas son del mismo material; su principal diferencia es la amplitud de las señales medidas, aunque guardan proporcionalidad entre ellas. Los cambios de signo de la señal medida en ciertas regiones es otra similitud en todos los gráficos. Estos cambios de signo para ciertas frecuencias de modulación están relacionados con los cambios en fase de la señal fotoacústica respecto a la señal de referencia. Esta relación se está estudiando para poder reconstruir la señal fotoacústica en magnitud y fase y así determinar los coeficientes de absorción óptica de las muestras.

Se observó que con el aumento de la frecuencia de modulación la desviación estándar de la amplitud de la señal

disminuyó desde ± 44 mV para mediciones a 30 Hz hasta 3.7 mV para mediciones a 2000 Hz. Esto está relacionado con la mejora en respuesta del micrófono. Para poder realizar mediciones a bajas frecuencias y por lo tanto poder obtener señales de zonas más profundas del material se requiere utilizar micrófonos con mejor respuesta a bajas frecuencias.

Con el objetivo optimizar el sistema desarrollado, se trabaja en una serie de mejoras de hardware y software. Esto permitirá obtener el coeficiente de absorción óptico de manera directa y además permitirá que el sistema desarrollado se utilice como una herramienta robusta en otras técnicas fototérmicas.

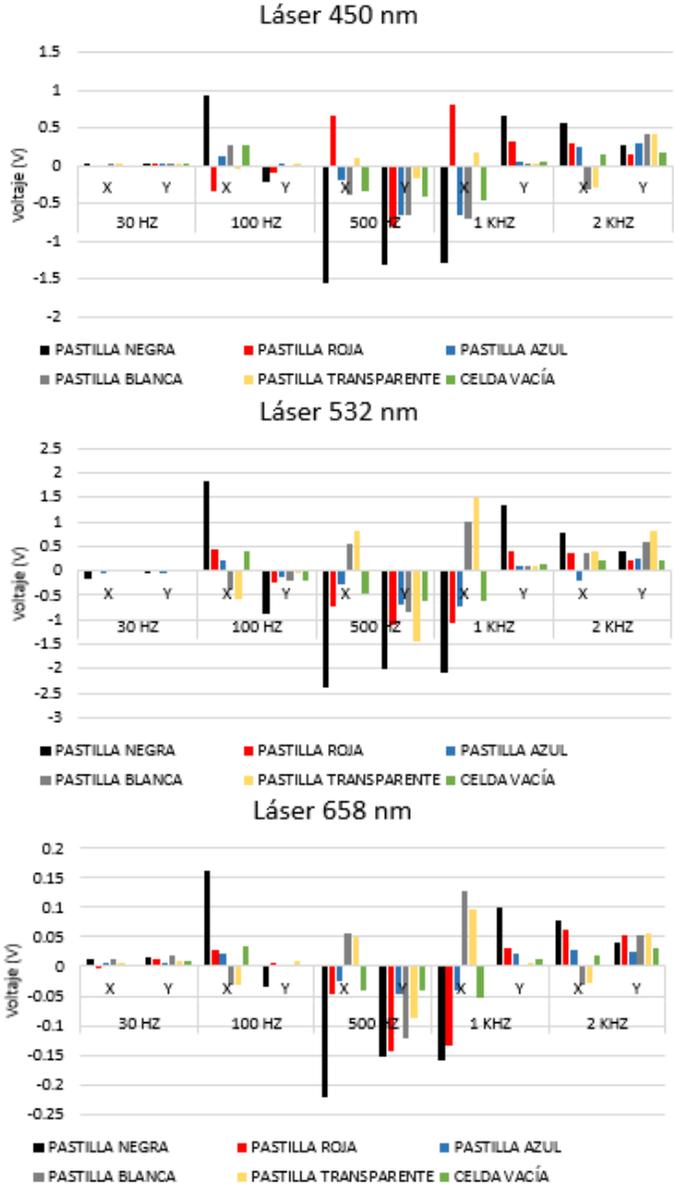


Figura 7. Mediciones para los láseres de 450, 532 y 658 nm.

BIBLIOGRAFÍA

[1] B. W. Pogue y M. S. Patterson, J. Biomed. Optics **11**, 041102 (2006).
 [2] E. Bossy y S. Gigan, Photoacoustics **4**, 22 (2016).

- [3] A. Rosencwaig y A. Gersho, *J. Appl. Phys.* **47**, 64 (1976).
[4] F. Gao, *et. al*, *Photoacoustics* **7**, 1 (2017).
[5] B. Verstraeten, J. Sermeus, R. Salenbien, J. Fizez, G. Shkerdin y C. Glorieux, *Photoacoustics* **3**, 64 (2015).
[6] J. S. Navarro, "Sistema de medición de la concentración de PpIX en tejido sintético empleando la detección sincrónica", Tesis de Maestría, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, 2016.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0, <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) license.

