



Fabricación de un prototipo para la medición de propiedades térmicas basado en el efecto fotoacústico

Manufacture of a prototype for the measurement of thermal properties based on the photoacoustic effect

Gasca-Figueroa David ¹, Bravo-Sánchez Micael Gerardo ², García-Rodríguez Francisco Javier ^{3,5}, Estrada-Álvarez Marco Antonio⁴, Zavala-Villalpando José Guadalupe ⁴

¹Estudiante del Programa Doctoral en Ingeniería del Instituto Tecnológico de Celaya, Av. Tecnológico S/N, Col. Fovissste, 38010 Celaya, Guanajuato, México.

²Departamento de Ingeniería Bioquímica, Instituto Tecnológico de Celaya. Av. Tecnológico S/N, Col. Fovissste, 38010 Celaya, Guanajuato, México.

³Departamento de Ingeniería Industrial, Instituto Tecnológico de Celaya. Av. Antonio García Cubas 1200, Col. Fovissste, 38010 Celaya, Guanajuato, México.

⁴Departamento de Ingeniería Mecatrónica. Instituto Tecnológico de Celaya. Av. Tecnológico S/N, Col. Fovissste, 38010 Celaya, Guanajuato, México.

⁵Estancia Sabática en la División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro. Cerro de Las Campanas, s/n, Centro Universitario, 76010 Querétaro, Querétaro.

Autor de correspondencia: David Gasca-Figueroa, Instituto Tecnológico de Celaya, Av. Tecnológico S/N, Col. Fovissste, 38010 Celaya, Guanajuato, México. E-mail: david.gasca@itcelaya.edu.mx. ORCID: 0000-0002-8113-7935.

Recibido: 30 de Junio del 2017 **Aceptado:** 12 de Diciembre del 2017 **Publicado:** 26 de Septiembre del 2018

Resumen. - *Los fenómenos físicos derivados del efecto fotoacústico resultan de suma importancia en la determinación de propiedades térmicas. En el presente trabajo, se realiza una revisión del fenómeno, su desarrollo, aplicaciones y formas de mejorar la señal fotoacústica. Se fabricó e instrumentó un sistema experimental de lecturas fotoacústicas, con capacidad de hacer pruebas en un rango de frecuencia variable y constante. Primero, se realizó el diseño, código G y fabricación de la mesa óptica en una máquina CNC de 3 ejes; luego, se estableció la comunicación del sistema experimental, utilizando la herramienta virtual LabView. Finalmente, se realizaron pruebas, los resultados obtenidos son consistentes con lo reportado en la literatura. El prototipo obtenido resulta ser muy compacto y práctico. Esto es posible, gracias a la eliminación de componentes mecánicas utilizadas en los sistemas tradicionales.*

Palabras clave: Efecto Fotoacústico; Propiedades Ópticas; Propiedades térmicas; Celda Fotoacústica; Modelo de Rosencwaig y Gersho.

Abstract. - *The physical phenomenon derived of the photoacoustic effect are employed in the determination of thermal properties. In the present work, a review of the phenomenon, its development, applications and ways of improving the photoacoustic signal is carried out. An experimental setup of photoacoustic signal is built and instrumented it works with variable and constant frequency. First, the design, G-code and fabrication of the optic table is realized in a 3 axes CNC; then, the experimental setup communication is established through the LabView software. Finally, probes were developed, the obtained results are consistent with the reported in the literature. The obtained prototype was compact and practice. It is possible, due to the elimination of the opto-mechanical components used in traditional systems.*

Keywords: Photoacoustic Effect; Optical Properties; Thermal properties; Photoacoustic Cell; Model of Rosencwaig and Gersho.



1. Introducción

En la actualidad, las técnicas basadas en el efecto fotoacústico tienen muchas aplicaciones [1-6]. Los mecanismos físicos involucrados son generados por una señal acústica producida, iluminando una muestra con un haz de luz modulado periódicamente en una celda cerrada [7]. Este efecto causa ondas acústicas que son detectadas por un micrófono. La técnica fotoacústica es una técnica versátil y no intrusiva para determinar propiedades térmicas, como lo son la difusividad o la conductividad térmica [8-13]. Con el desarrollo de nuevos materiales con posibles aplicaciones

tecnológicas, así como la investigación en procesamiento de materiales, se ha impulsado el diseño y puesta en marcha de nuevas técnicas que permitan la caracterización de sus propiedades [3], estructura interna [14,15] y los posibles procesos electrónicos que ocurren en ellos [15-17]. Dentro de las propiedades macroscópicas importantes se encuentran las propiedades térmicas, de las cuales se pueden mencionar: Capacidad calorífica, calor específico, capacitancia térmica, conductividad térmica, difusividad térmica, efusividad térmica y coeficiente de expansión térmica.

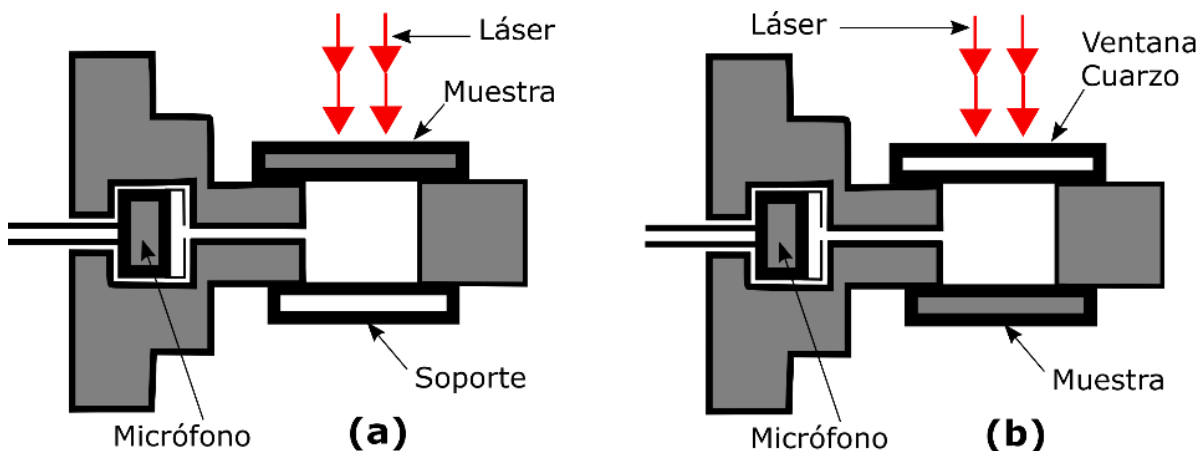


Figura 1. Esquema de las dos principales formas de medición a) configuración de transmisión y b) configuración de reflexión.

La técnica fotoacústica ha sido empleada en la medición desde grandes materiales, películas delgadas, multicapas, muestras porosas hasta matrices de nanocables [15, 18-20]. Balderas 2005 realizó la medición de la difusividad térmica en materiales ópticamente opacos, normalizando la señal fotoacústica, a diferencia de otras metodologías de normalización, esta corresponde a un material de referencia semi-infinito. Hu y su equipo de colaboradores derivaron una expresión generalizada para el efecto fotoacústico en materiales multicapa. La expresión toma en cuenta las propiedades ópticas y térmicas, así como la geometría de una

estructura multicapa, ellos obtuvieron resultados muy próximos a los resultados experimentales. En 1999, Kalapy y colaboradores midieron la conductividad térmica en una matriz de nanocables de compósito epóxico de telurio de bismuto. En 2014 Begoña y colaboradores midieron la conductividad térmica de lignosulfonato de sodio mediante la técnica fotoacústica obteniendo valores de 1W/m-K empleando el modelo de multicapa desarrollado por Hu.

Los experimentos en la celda fotoacústica pueden ser desarrollados en dos diferentes



configuraciones experimentales: Configuración delantera y trasera como se muestra en la figura 1. En la configuración delantera (modo de reflexión), la muestra es iluminada de manera perpendicular a la superficie de la muestra de tal manera que las ondas acústicas son creadas en una fina capa adyacente a la superficie irradiada, por el contrario, en la configuración trasera las ondas acústicas son detectadas en el gas adyacente a la superficie trasera de la muestra, i.e., en la superficie opuesta a la cara que es irradiada, a este caso también se le conoce como transmisión. Una variante de la configuración trasera es la bien conocida: celda fotoacústica abierta, la cual consiste en colocar la muestra directamente sobre el micrófono sin una celda fotoacústica de por medio [21], el micrófono empleado por M D da Silva y su equipo de trabajo es un micrófono de electreto, este micrófono tiene la característica de que está sellado y solo existe una pequeña cámara cilíndrica que es parte del mismo micrófono y es donde las ondas acústicas son detectadas o producidas por el micrófono según sea la aplicación deseada, esta característica especial permite colocar la muestra justo encima del micrófono con ayuda de pasta térmica para aislar del ruido externo y entre la muestra y el micrófono constituyen una pequeña celda fotoacústica del tipo trasera o en modo de transmisión. Desde luego que el micrófono juega un papel primordial en esta configuración y su respuesta ante la variación de frecuencia es importante conocerla para incluirla o eliminarla en la respuesta obtenida en el lock-in.

La principal ventaja de la técnica es que su sistema de detección es único, el micrófono no es afectado por la resistencia térmica de contacto y es relativamente económico. Sin embargo, es limitado por la respuesta del micrófono a la frecuencia que puede variar desde Hz hasta kHz, así, la longitud de penetración térmica también se ve limitada acorde con la ecuación 1.

$$\mu = \sqrt{\frac{\alpha}{\pi f}} \quad (1)$$

En el presente trabajo, se realiza la fabricación e instrumentación de un sistema experimental de lecturas fotoacústicas, haciendo uso de la herramienta virtual LabView. El procedimiento es coleccionar los datos experimentales producto de la absorción del calor en sólidos [22], mediante el uso de instrumentos virtuales que permitan comunicar cada uno de los módulos del sistema. Para generar el efecto fotoacústico se coloca una muestra sobre una celda hermética, con un gas encerrado (generalmente aire) y se ilumina con un haz de luz modulada. Las ondas térmicas generadas dentro del sólido, por la absorción de radiación, se difunden hacia el gas en contacto con la superficie, provocando fluctuaciones de presión en el interior de la celda, las cuales son detectadas con un micrófono de electreto acoplado a la celda [7]. Esta señal detectada por el micrófono se recupera en forma de señal eléctrica. En la figura 2, se observa el esquema básico y elementos necesarios para la generación y detección del efecto fotoacústico. En el diseño del prototipo, se incluye el diseño y fabricación de la mesa óptica. Se instala y calibran las componentes del sistema y se desarrolla un software para realizar la comunicación entre los dispositivos y coleccionar los datos experimentales.

2. Metodología

Se construye un prototipo para la medición de propiedades térmicas basado en el efecto fotoacústico. A continuación, en la sección 2.1 se presenta la descripción detallada del sistema experimental y en la 2.2 se presentan las ecuaciones importantes y los experimentos realizados.

2.1. Configuración del sistema experimental.

El diagrama de bloques del equipo experimental se observa en la figura 2. En primera instancia, mediante la interfaz gráfica creada en LabView es posible manipular las funciones del amplificador lock-in desde la PC y seleccionar así los parámetros de trabajo del experimento.



El amplificador lock-in cuenta con un oscilador interno el cual, una vez preestablecido su valor de la amplitud y frecuencia, se conecta al controlador del diodo láser y de esta manera el diodo láser trabajará a la misma señal de frecuencia que la del oscilador interno del amplificador. Enseguida, el haz de luz láser incide a cierta frecuencia sobre una muestra de interés que descansa a su vez sobre la celda fotoacústica. La celda está conformada por una cámara de gas (en este caso aire) herméticamente cerrada y acoplado a un micrófono cuya función es detectar los cambios de presión dentro de la cámara de gas debido a las variaciones de temperatura dentro de la misma. El micrófono convierte las ondas acústicas detectadas en señales eléctricas, las cuales pasan por un preamplificador antes de pasar por el amplificador quien finalmente limpia y almacena la información de amplitud y

fase de dicha señal eléctrica. La información de fase y amplitud de la señal eléctrica resultante se almacena en el amplificador lock-in y LabView extrae dicha información para posteriormente trazar una gráfica de amplitud en función de la frecuencia. El diodo láser, así como la celda fotoacústica descansan sobre una mesa óptica, diseñada y fabricada en nuestro laboratorio; para evitar que cualquier vibración externa perturbe el experimento.

2.2. Modelo teórico

La teoría del efecto fotoacústico en sólidos fue desarrollado por Rosencwaig y Gersho quien resolvió la ecuación de difusión para cada capa: material de soporte, muestra sólida y la capa de gas empleando las condiciones de frontera apropiadas.

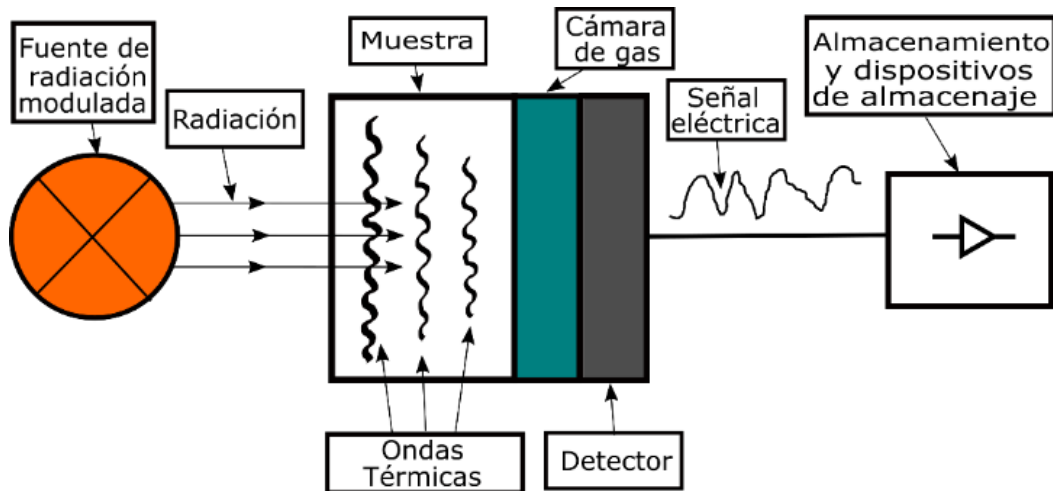


Figura 2. Configuración experimental del sistema fotoacústico.

La ecuación de difusión térmica en la muestra, tomando en cuenta la fuente de calor, se escribe como se muestra en la ecuación 2.

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \theta}{\partial t} - A e^{\beta x} (1 + e^{i\omega t}); -1 \leq x \leq 0 \quad (2)$$

donde, $A = \beta I_0 \eta / 2k$, θ es la temperatura y η es la eficiencia a la cual la luz absorbida a la

longitud de onda λ es convertida en calor por el proceso de desexcitación no radiativa. Se asume que $\eta=1$. Para la muestra y soporte se emplea la misma ecuación sin el último término que es el término asociado a la incidencia de la luz en la muestra.

3. Instrumentación del sistema



La instrumentación del sistema experimental se divide básicamente en cuatro etapas: 1. Interfaz de usuario. Aquí, se seleccionaron los controladores e indicadores para configurar diversas funciones del amplificador; modo de operación, i.e., si el proceso se va a ejecutar de manera manual o automática y dos gráficas donde registran los valores obtenidos de amplitud y fase contra frecuencia. El *modo manual*, permite seleccionar la frecuencia y la fase del oscilador interno, así como su amplitud. Además, es posible configurar otras funciones del lock-in como la constante de tiempo, la sensibilidad, los filtros, entre otras funciones. En el *modo automático*, se debe seleccionar la frecuencia mínima y máxima con la que se va a trabajar, así como el incremento de la misma y

un tiempo de espera entre cada lectura, esto con el fin de que se establezca la señal una vez que incrementa la frecuencia. También cuenta con un controlador para seleccionar el número de lecturas que se van a obtener por cada frecuencia, se realiza un promedio de las mismas y finalmente se gráfica. 2. Conexión serial de la PC con el amplificador lock-in RS830. Se establece la comunicación entre la PC y el amplificador lock-in RS830, se requieren controladores que permitan el enlace, utilizando el protocolo de comunicación serial RS232, esto se consiguió utilizando NI-VISA de National Instruments. Una vez realizada la comunicación entre los dispositivos, se desarrolló el instrumento virtual (VI), generado en la plataforma LabView (figura 3).

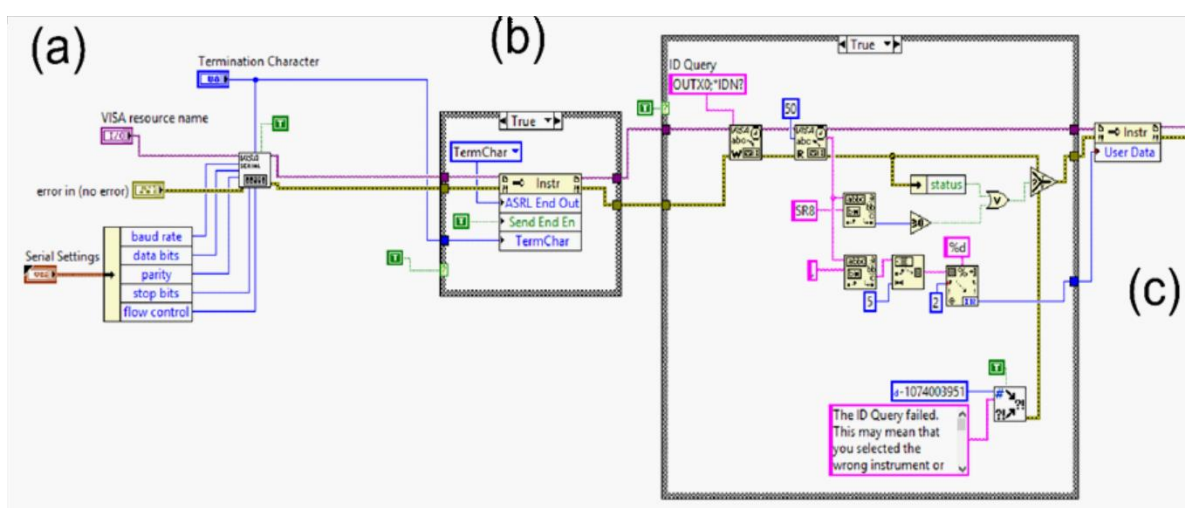


Figura 3. Diagrama de bloques para realizar la comunicación RS232, (a) Bloque VISA. Se refiere a la comunicación del sistema, (b) habilitación determinación de carácter y (c) identificación del dispositivo.

3. Configuración de los parámetros. Se envían comandos al amplificador para especificar ciertas condiciones; como la frecuencia de trabajo, amplitud de la señal, fase, sensibilidad, entre otros aspectos necesarios para adquirir una lectura limpia de la señal. Recordando que la ejecución del experimento se realizar de forma manual o automática, estructurando las correspondientes funciones. Finalmente, 4.

Lectura de datos. Se cuenta con un controlador en la interfaz de usuario el cual selecciona el número de lecturas de amplitud que se ven a tomar por cada frecuencia, para posteriormente realizar un promedio de estas lecturas y finalmente la lectura promedio obtenida se grafica en la gráfica correspondiente. Es importante mencionar que tanto el diagrama de bloques para la configuración de parámetros, así



como el diagrama de bloques para la lectura de datos, están contenidos dentro de un mismo ciclo.

4. Procedimiento experimental

Para determinar la difusividad térmica pueden seguirse varios procedimientos fundamentados en la técnica fotoacústica. Se utilizaron las configuraciones de transmisión y de reflexión en aluminio, cobre, acero y polímero ABS, para comprobar convergencia. En metales está metodología permite eliminar la función de transferencia. El método de transmisión consiste en incidir la luz láser hacia la muestra, la cual está en la parte frontal de la celda y solo el calor que logre traspasar la muestra hacia el interior de la celda contribuye a la señal foto acústica, en tanto que el modo de reflexión por su parte consiste en colocar la muestra por la parte posterior de la celda y el calor reflejado hacia el

interior de la celda es el causante la señal de presión acústica. En ambos casos el interior de la celda debe estar sellado para evitar la interacción con posibles perturbaciones externas, como se muestra en la figura 4.

Se analizaron muestras de 8x15 mm, en Al, Lámina de acero, aleación AISI 304 y ABS con espesores de 0.15 mm. En todos los casos, el tiempo para estabilizar: 5s entre cada punto. Mediciones por punto: 5. Tiempo entre cada medición: 1s. El comportamiento encontrado utilizando la metodología RG y la auto normalización, permitieron determinar los valores de difusividad para cada uno de estos materiales, los cuales concuerdan con los valores reportados en la literatura. Es importante mencionar que todos estos materiales son homogéneos, isotrópicos y lineales.

El sistema es confiable, ya que su precisión es mayor al 95% con respecto a los datos consultados en la literatura.

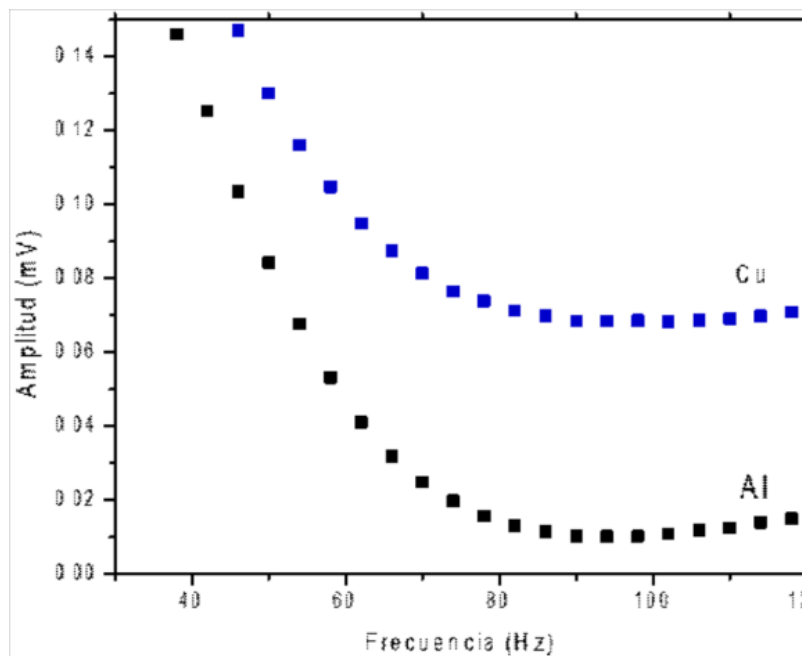


Figura 4. Señal fotoacústica producida en el rango de frecuencias de 1 a 120 Hz para aluminio (Al) y Cobre (Cu).



Tabla 1. Comparación entre las difusividades térmicas de aluminio, acero AISI1304 y polímero ABS obtenidas a través de la técnica fotoacústica y las reportadas en la literatura.

Material	Difusividad térmica obtenida (cm^2 / s)	Difusividad térmica reportada (cm^2 / s)
Aluminio	0.3964	0.3982
Acero AISI304*	0.03458	0.03633
Polímero tipo ABS	$\approx 3.73 \times 10^{-4}$	3.75×10^{-4}

La metodología converge en un resultado muy similar al presentado en la tabla 1, por lo cual puede ser empleado en los demás materiales sólidos siempre y cuando sean homogéneos y en los metales tomando como referencia al aluminio y al acero y así eliminar el efecto de la función de transferencia del sistema, obteniendo un resultado más preciso.

5. Aplicaciones y otros desarrollos

Un buen número de modificaciones y mejoras han sido reportadas para esta técnica. En 1977 Aamodt y otros [23] estudiaron la dependencia de la sensibilidad de un espectrómetro fotoacústico sobre las dimensiones de la celda a causa de que las amplitudes de las fluctuaciones de presión en el gas dependen de la intensidad de la luz incidente, propiedades térmicas de la muestra y el gas y de los procesos de difusión térmica causantes del flujo de calor, además concluyeron que los fenómenos de difusión en gases son mucho más complejos y esto es atribuido a que la temperatura se separa los gases en una parte térmica o que no propaga la señal y en una parte acústica que sí propaga la señal. McDonald y Wetsel extendieron la teoría del efecto fotoacústico al incluir la contribución de las vibraciones mecánicas de la muestra, lo cual fue descrito como un acoplamiento acústico entre las ecuaciones de difusión de calor y de ondas acústicas [24]. Este efecto es importante para líquidos, por su alto coeficiente de expansión

térmico, y para muestras transparentes, debido a que el acoplamiento acústico es alto cuando el coeficiente de absorción óptico es reducido. Su trabajo es una extensión del modelo del pistón de Rosencwaig y Gersho. En su trabajo concluyen que el movimiento mecánico de líquidos y sólidos puede afectar considerablemente la señal fotoacústica y puede ser dominante para algunas muestras líquidas. Su modelo de pistón compuesto es válido para muestras térmicamente gruesas.

Posteriormente, Cesar y otros estudiaron la señal fotoacústica de un sólido, incluyendo la resistencia térmica superficial de la muestra [25], en este trabajo se hace mención al significado de una resistencia térmica considerada como nula. Una resistencia térmica nula significa que la transferencia de calor entre los dos medios es instantánea o, alternativamente, que la emisividad de la superficie es infinita. Después, Quimby y sus colegas en 1980 desarrollaron un modelo unidimensional para el efecto fotoacústico en sólidos, el cual es válido asumiendo que la longitud de difusión térmica es mucho menor que el radio de la muestra. [26] Este estudio simplifica considerablemente el desarrollo matemático. En el mismo año, Fernelius estudio las muestras bicapa, donde cada capa tenía propiedades ópticas y térmicas diferentes [27], aquí se estudia el efecto de agregar una capa sobre algún material con propiedades distintas a la muestra de estudio. Poulet estudio la espectroscopia fotoacústica cuantitativa, aplicada a muestras térmicamente gruesas, donde las variaciones teóricas del módulo y fase de la señal fotoacústica, fueron comparados con los resultados experimentales para un amplio rango de muy o moderadamente materiales absorbentes [28], en su trabajo se evidencia el rango de influencia de los fenómenos de acoplamiento resaltados por otros autores y se hace énfasis en el rango de validez para sustancias absorbentes, también se concluye que las técnicas espectroscópicas en el modo de transmisión no son capaces de realizar estos análisis debido a la naturaleza moderada o altamente absorbente de las muestras de trabajo.



El equipo de Rousset desarrollo un modelo que contempla la flexión termoelástica, la cual es la expansión térmica a lo largo del espesor de la muestra debido al gradiente térmico inducido, la flexión termoelástica de muestras solidas produce fuertes señales fotoacústica, las cuales no pueden ser analizadas por cálculos de fotoacústica usuales, su modelo es acorde con los datos obtenidos mediante un sensor termoelástica de deformaciones, más aun, el modelo desarrollado es también consistente con calculo previos piezoeléctrico-fotoacústico y sirve para la determinación de difusividades térmicas [29]. Esta puede ocurrir cuando se miden muestras sólidas, especialmente en la configuración trasera. Otros trabajos mejoran la adquisición de datos y la obtención de la difusividad térmica al considerar otros fenómenos tales como difusión térmica y la flexión termoelástica [30, 31].

Somer y su equipo de colaboradores en 2013 exploraron el potencial de la celda fotoacústica abierta al estudiar los efectos del proceso de flexión termoelástica y los procesos de difusión en la generación de la señal fotoacústica en sólidos, como conclusión obtuvieron que la flexión termoelástica se incrementa cuando el espesor de la muestra disminuye, esta información fue aprovechada para coleccionar datos y emplear el parámetro de flexión termoelástica como una función del espesor de la muestra, se concluye que el proceso de difusión térmica está siempre presente en la generación de la señal fotoacústica sin importar el espesor de la muestra y que la flexión termoelástica es más efectiva y puede emplearse como un parámetro de medición a medida que el espesor de la muestra disminuye. En 2015 Bedoya y colaboradores implementan una metodología de punta que puede ser empleada para mediciones térmicas de precisión por medio de fotoacústica.

Rodríguez y colaboradores (2007) desarrollo una novedosa celda fotoacústica diferencial (DPC) con objeto de estudiar procesos dinámicos. La DPC tiene la capacidad de medir en tiempo real la amplitud y la fase de la señal fotoacústica tanto para la muestra de trabajo como para la muestra de referencia bajo estudio. Las mediciones simultáneas de ambas señales eliminan la función instrumental, y la presencia de ruido, debido a

alguna desviación originada por factores eléctrico, óptico y ambiental. La DPC puede ser usada a diferentes perfiles de temperatura de modo que se obtiene la función instrumental. La celda fotoacústica diferencial también tiene todos los elementos de una celda electroquímica capaz de seguir los procesos electroquímicos, como resultado de esta instrumentación es posible obtener en tiempo real la amplitud y la fase de la señal fotoacústica viniendo de la muestra sin alguna interferencia por parte del sistema. En su trabajo presenta dos casos como una demostración de su trabajo aplicado a dos campos de estudio: La electrodeposición de zinc sobre un sustrato de acero, así como el estudio de la difusión de iones agua y calcio dentro de capas orgánicas [16].

Una de las grandes ventajas del trabajo de Rodríguez, es que en su celda se propone un control de temperatura, esto puede evitar las variaciones de la temperatura ambiente y es posible lograr una mayor estabilidad térmica. Incluso su trabajo amplio la posibilidad de incrementar la señal fotoacústica a través de la variación de temperatura, esto a causa de que el sonido viaja más rápidamente cuando la temperatura aumenta. Marquezini desarrollo un trabajo en el cual se incluye la respuesta del micrófono ante la variación de la frecuencia de la onda incidente sobre la muestra de trabajo, en este trabajo se desarma un micrófono de electroreto y se analizan los efectos debido a su fabricación y con ello se obtiene un modelo matemático que representa la respuesta del micrófono [32].

Finalmente, en el trabajo de Cortes-Ibarra y colaboradores se muestra la importancia de la celda fotoacústica diferencial en la medición in situ de diversos procesos dinámicos, en su trabajo se mide la permeabilidad del agua en hueso descalcificado [33].

6. Conclusiones

Se fabricó un sistema experimental de lecturas ópticas haciendo uso de la herramienta virtual LabView. Se realizaron mediciones en aluminio y acero. Los valores resultantes de difusividad



térmica medidos al usar las diferentes metodologías convergieron de acuerdo con los valores reportados en la literatura, mostrando auto-consistencia.

LabView mostró ser una excelente herramienta para la instrumentación virtual de sistemas experimentales, ya que, al ser un ambiente de programación por bloques, es sumamente intuitiva, es posible modificar o agregar fácilmente más funciones de ser necesario, además de ahorrar tiempo, con respecto a otros lenguajes de programación. Con respecto a las mediciones realizadas, el sistema instrumentado, permite obtener propiedades térmicas en materiales opacos, mediante pruebas no destructivas.

La técnica fotoacústica (TFA), ha sido ampliamente utilizada para diagnósticos térmicos en una diversidad de materiales. El principio básico de esas técnicas consiste en las mediciones indirectas de las fluctuaciones de temperatura como un resultado del proceso de desexcitación no radiativa que toma lugar siguiendo la absorción de la intensidad de radiación modulada. Con algunas pocas excepciones TFA involucra el análisis de la señal como una función de la frecuencia de modulación.

Referencias

- [1] E. J. G. Albarracín and D. G. P. de Lema, "Impact of innovation on the performance of msme: An empirical study conducted in Colombia," *Estud. Gerenciales*, vol. 28, no. 122, pp. 11-27, 2012. [https://doi.org/10.1016/S0123-5923\(12\)70191-2](https://doi.org/10.1016/S0123-5923(12)70191-2).
- [2] E. Arellano. "Revisión Bibliométrica sobre Administración Estratégica y Estrategia en base de datos Scopus Bibliometrics on strategic management and strategy in Scopus database", 2015. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2367.7200.2015>.
- [3] D. J. Teece, "Dynamic capabilities: a guide for managers," *Ivey Bus. J.*, vol. 75, no. 2, pp. 29-33, 2011. <https://notts.rl.talis.com/items/DE49C8C1-9E2B-9FE3-3D11-CA77094F47B5.html>.
- [4] M. de L. Álvarez Medina, "Competencias centrales y ventaja competitiva: el concepto, su evolución y su aplicabilidad," *Contaduría y Adm.*, vol. 1, no. 209, pp. 5-22, 2003. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=39520902>.
- [5] H. Chesbrough, "Business Model Innovation: Opportunities and Barriers," *Long Range Plann.*, vol. 43, no. 2, pp. 354-363, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.lrp.2009.07.010>.
- [6] D. J. Teece, "Business Models, Business Strategy and Innovation," *Long Range Plann.*, vol. 43, no. 2, pp. 172-194, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.lrp.2009.07.003>.
- [7] M. Delgado Fernández and F. Castro Díaz Balart, "Innovación tecnológica, estrategia corporativa y competitividad en la industria cubana," *Dir. y Organ. Rev. Dir. Organ. y Adm. Empres.*, vol. 0, no. 22, pp. 14-27, 1999. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=169902>.
- [8] M. A. Morales-González and J. L. Pech-Vázquez, "Competitividad y estrategia: el enfoque de las competencias esenciales y el enfoque basado en los recursos," *Rev. Contaduría y Adm.*, no. 197, pp. 47-63, 2000. <https://www.biblioteca.org.ar/libros/91537.pdf>.
- [9] R. Casadesus-Masanell and F. Zhu, "Strategies to Fight Ad-Sponsored Rivals," *Manage. Sci.*, vol. 56, no. 9, pp. 1484-1499, Jul. 2010. <https://doi.org/10.1287/mnsc.1100.1199>.
- [10] M. Ferreira, F. Serra, A. Torres, and M. Torres, *Administração Estratégica*. Elsevier Brasil, 2014. http://redeetec.mec.gov.br/images/stories/pdf/proeja/administracao_estrat.pdf.
- [11] M. P. Nunes and F. K. Steinbruch, "Internationalization and the need of business model innovation - A theoretical approach," *Brazilian Bus. Rev.*, vol. 16, no. 3, pp. 207-221, 2019. <https://doi.org/10.15728/bbr.2019.16.3.1>.
- [12] M. Díaz Pérez, Y. de Liz Contreras, and S. Rivero Amador, "El factor humano como elemento dinamizador del proceso empresarial en la gestión de la información y conocimiento," *Acimed*, vol. 20, no. 5, pp. 42-55, 2009. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_artext&pid=S1024-94352009001100004&lng=es&tlng=es.



- [13] S. Iammarino, M. Piva, M. Vivarelli, and N. Von Tunzelmann, "Technological Capabilities and Patterns of Innovative Cooperation of Firms in the UK Regions," *Reg. Stud.*, vol. 46, no. 10, pp. 1283-1301, Nov. 2012. <https://doi.org/10.1080/00343404.2012.679259>
- [14] M. G. Zoia, L. Barbieri, F. Cortelezzi, and G. Marseguerra, "The determinants of Italian firms' technological competencies and capabilities," *Eurasian Bus. Rev.*, vol. 8, no. 4, pp. 453-476, 2018. <https://doi.org/10.1007/s40821-018-0103-2>.
- [15] A. Pourhasan Harandi. "The effect of Information technology systems on productivity in Electronic Company of Sistan and Baluchestan Province, Iran", (unpublished Dissertation of M.A. of Management, Economics Collage), University of Sistan and Baluchestan, Iran. 2012. <https://www.ijmae.com/index.php?mod=journalman&act=18&pid=448>
- [16] F. Mousavifard, M. Kazemi, and A. Ayoubi, "Employees' Productivity and Automated Information System in Telecommunication Organization in Iran," *Int. J. Manag. Account. Econ.*, vol. 3, no. 3, 2016. https://www.civilica.com/Paper-JR_IJMAE-JR_IJMAE-3-3_003.html.
- [17] H. Zhou, R. Dekker, and A. Kleinknecht, "Flexible labor and innovation performance: evidence from longitudinal firm-level data," *Ind. Corp. Chang.*, vol. 20, no. 3, pp. 941-968, Apr. 2011. <https://doi.org/10.1093/icc/dtr013>
- [18] T. Wang and C. D. Zatzick, "Human Capital Acquisition and Organizational Innovation: A Temporal Perspective," *Acad. Manag. J.*, vol. 62, no. 1, pp. 99-116, Mar. 2018. <https://doi.org/10.5465/amj.2017.0114>
- [19] K. Lee and J. Yoo, "How does open innovation lead competitive advantage? A dynamic capability view perspective," *PLoS One*, vol. 14, no. 11, p. e0223405, Nov. 2019. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0223405>
- [20] C. Caldwell and V. Anderson, *Competitive Advantage: Strategies, Management and Performance*, 1st ed. Nova Science Publishers, Incorporated, 2017. <https://novapublishers.com/shop/competitive-advantage-strategies-management-and-performance/>
- [21] B. Escrig-Tena, J. C. Bou-Llusar, V. Roca-Puig, and L. Beltrán-Martín, "Does quality management drive labour flexibility?," *Total Qual. Manag. Bus. Excell.*, vol. 23, no. 2, pp. 159-176, 2012. <https://doi.org/10.1080/14783363.2012.647845>
- [22] P. T. Preenen, R. Vergeer, K. Kraan, y S. Dhondt, "Labour productivity and innovation performance: The importance of internal labour flexibility practices," *Econ. Ind. Democr.*, p. 0143831X15572836-, 2015. <https://doi.org/10.1177/0143831X15572836>.
- [23] T. Melton, "The Benefits of Lean Manufacturing: What Lean Thinking has to Offer the Process Industries," *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 83, no. 6, pp. 662-673, 2005. <https://doi.org/10.1205/cherd.04351>
- [24] G. Thomas and M. Thomas, "Lean Thinking," *Construction Partnering & Integrated Teamworking*. pp. 159-163, 01-Aug-2005. <https://doi.org/10.1002/9780470759660>



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Usted es libre para Compartir—copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y Adaptar el documento—remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia](#) - [Texto completo de la licencia](#)