

ESTADO DEL ARTE DE TÉCNICAS FOTOTÉRMICAS Y SUS APLICACIONES EN EL ÁREA ENERGÉTICA

Artículo arbitrado 28

Edición 15

Erick Gutiérrez Zeferino¹, Carlos Omar González Morán², Oscar Osvaldo Sandoval González³ y José de Jesús Agustín Flores Cuautle⁴

^{1,3}Tecnológico Nacional de México /
Instituto Tecnológico de Orizaba
Avenida Oriente 9 Núm. 852, Colonia
Emiliano Zapata, Orizaba, Veracruz, México,
C. P. 94320.

²UAEM/Valle de México, Laboratorio
de Investigación en Materiales y Procesos
Inteligentes, Atizapán de Zaragoza, Estado de
México, México, C. P. 54500.

⁴CONACYT- Tec.N.M./I.T.Orizaba
Avenida Oriente 9 Núm. 852, Colonia Emiliano
Zapata Orizaba, Veracruz, México, C. P. 94320.

coglez@gmail.com

Recibido: Septiembre 14, 2020.

Recibido en forma revisada: Noviembre 6, 2020.

Aceptado: Noviembre 11, 2020.

Resumen: Las técnicas fototérmicas si bien, no son un campo de estudio nuevo, ofrecen una enorme variedad de aplicaciones en los más diversos campos, tal como la salud, el estudio de materiales, medición de pureza de líquidos, entre otras. Uno de los campos de estudio de dichas técnicas es el sector energético, dentro de este campo, el estudio de las propiedades térmicas de algunos materiales tales como los materiales de cambio de fase (PCM Phase Change Material), los nanofluidos, así como biodiesel son los de mayor auge respecto al ahorro de energía térmica. En aplicaciones en las cuales se requiere de estudiar el intercambio térmico las técnicas fototérmicas son de utilidad. En el presente trabajo, se explican algunas de las técnicas fototérmicas más utilizadas son explicadas se mostrarán diversos estudios relacionados con los materiales antes mencionados durante la última década.

+ Palabras clave: Aplicaciones en energía, materiales de cambio de fase, ondas térmicas, nanofluidos

Abstract: Although photothermal techniques are not a new field of study, they offer an enormous variety of applications in the most diverse fields, such as health, the study of materials, measurement of purity of liquids, among others. One of the fields of study of these techniques is the energy sector; within this field, the study of the thermal properties of phase change materials (PCM), nanofluids, and biodiesel are the most

booming concerning thermal energy savings. In applications in which it is required to study the thermal exchange, photothermal techniques are useful. In this paper, some of the most used photothermal techniques are explained and will review various studies related to the energy sector during the last decade.

+ Keywords: Energy applications, phase change materials, thermal waves, nanofluids.

Introducción

Las técnicas fototérmicas (TF) consisten en la detección de ondas térmicas que se producen en un material como resultado de la absorción de un haz de luz de intensidad variable por dicho material; dicho haz de luz puede ser modulado o pulsado (Balderas-López, Gutiérrez-Juárez, Jaime-Fonseca, y Sánchez-Sinencio, 1999). De acuerdo con el tipo de fenómeno físico empleado para el estudio de los materiales, las técnicas fototérmicas pueden clasificarse en Efecto Mirage (lente térmica), Radiometría, espectroscopía, fluorescencia, ultrasonido laser, termorreflectancia (Glorieux et al., 2006; Gusev, Desmet, Lauriks, Glorieux, y Thoen, 1996; Salazar, Sánchez-Lavega, Terrón, y Gateshki, 2000). Con base al tipo de detector empleado las técnicas fototérmicas se pueden dividir en fotoacústica, fotopiroeléctrica (Flores Cuautle, Suaste Gomez, y Cruz Orea, 2009; Mandelis y Zver, 1985), la Figura 1, ejemplifica algunas de las diversas técnicas fototérmicas mencionadas.

Se han desarrollado diversas metodologías experimentales para la obtención de propiedades térmicas, en particular las técnicas han sido empleadas para obtener las denominadas propiedades térmicas dinámicas (difusividad y efusividad térmicas) (Figura y Teixeira, 2007; Lara Hernandez et al., 2020).

como se ha mencionado de las propiedades físicas del material bajo estudio, como consecuencia, las ondas térmicas llevan información sobre la estructura interna, las propiedades ópticas y térmicas del material (Flores Cuautle, Suaste Gomez, y Cruz Orea, 2011). El análisis de esta información mediante diversas técnicas de detección permite obtener información de las propiedades antes mencionadas. Entre las técnicas más utilizadas se puede mencionar: la termorreflectancia, radiometría infrarroja, la foto deformación, lente térmica, la fotoacústica y la espectroscopia fotopiroeléctrica (Bernal-Alvarado, Mansanares, Silva, y Moreira, 2003; Guo, Mandelis, y Zinman, 2012; Kusiak, Ch, y Battaglia, 2010; Lopez-Munoz, Pescador-Rojas, Ortega-Lopez, Salazar, y Balderas-Lopez, 2012; Terhoeven-Urselmans, Schmidt, Georg Joergensen, y Ludwig, 2008; Xu et al., 2016).

Entre las diferentes aplicaciones que en las que se han utilizado las técnicas fototérmicas, un área de interés son las aplicaciones relacionadas con la generación de energía. Entre las formas de captación de energía solar el uso colectores solares térmicos e intercambiadores de calor es amplio. Tanto en los colectores solares como en los intercambiadores de calor la transferencia de energía térmica es un factor clave, por lo tanto, es necesario conocer tanto las propiedades térmicas de los materiales como el coeficiente de conversión fototérmico. Para mejorar las características de los colectores solares y los intercambiadores de calor, los materiales de cambio de fase, así como los denominados nanofluidos son ampliamente usados. En este trabajo analizaremos las diferentes técnicas fototérmicas relacionándolas debidamente con el área de generación de energía durante la última década.

Técnicas fototérmicas

Termorreflectancia

La termorreflexión o termorreflectancia es un método óptico sin contacto que aprovecha las variaciones de reflectividad local inducidas por el calentamiento, para deducir una medida de temperatura, la cual se pueden utilizar para prácticamente cualquier longitud de onda (Hatori, Taketoshi, Baba y Ohta, 2005).

La sensibilidad de la técnica de termorreflexión está determinada por el grado de cambio en la reflectividad con los cambios en la temperatura. La medida de esta variación se denomina coeficiente de termorreflexión (CTR). Para los materiales utilizados en dispositivos electrónicos, los valores del coeficiente de termorreflexión varían en varios ordenes de magnitud, por encima y por debajo de 10^{-4} K^{-1} . Además, el coeficiente de termorreflexión varía ampliamente con la longitud de onda de la irradiación de la luz.

Radiometría fototérmica infrarroja

Si a un cuerpo absorbente se le hace incidir una radiación monocromática o policromática modulada, se generará un cambio también modulado de la temperatura de su superficie, como resultado de este proceso de absorción de radiación y la conversión no radiativa de energía. Esa energía emitida por el cuerpo puede ser observada a través de la emisión de radiación de cuerpo negro de la superficie y del bulto (radiación de Planck).

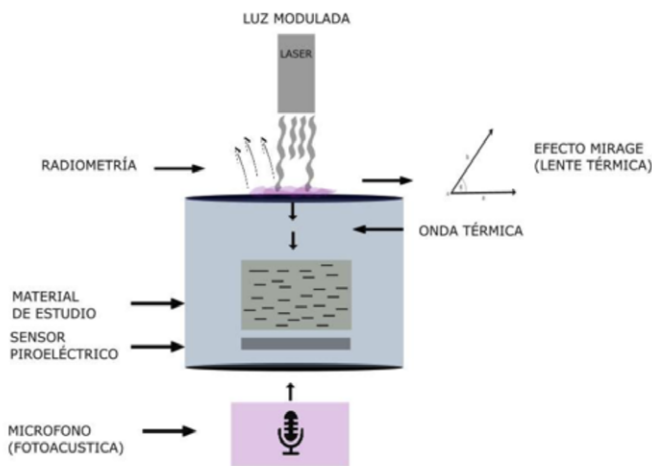


Figura 1. Fenómenos físicos asociados a las Técnicas fototérmicas.

Fuente: (Lara-Hernández et al., 2013).

Los rasgos más importantes que definen la onda térmica son la longitud de onda y la velocidad de fase, las cuales están determinadas por las propiedades térmicas del material. Si el material bajo estudio es homogéneo las ondas térmicas se propagan libremente, sin embargo, para materiales heterogéneos, las ondas térmicas sufrirán un proceso de dispersión cuando en su avance se encuentre con discontinuidades. La transmisión, así como la dispersión de la onda térmica, depende

Midiendo las variaciones de emisión de cuerpo negro es posible obtener información sobre el espectro de absorción (propiedades físicas térmicas y electrónicas) (Mendoza y Rodríguez, 2001).

Una de las ventajas en la utilización de esta técnica fototérmica es debido a su carácter no destructivo, remoto y sin contacto, “además de permitir el análisis de muestras en forma lineal. Los parámetros térmicos y termoelectrónicos que se pueden obtener a través de un espectro radio térmico son: la velocidad de recombinación frontal (S1) y trasera (S2), coeficiente de difusión de portadores (Dn,p), tiempo de vida de portadores minoritarios (T), así como la difusividad térmica (α)” (Mendoza y Rodríguez, 2001). Se trata de una técnica muy eficiente en el estudio de muestras que tengan una elevada emisividad de radiación (polímeros, cerámicos, metales no pulidos, etc.).

Lente térmica

Cuando un haz de luz de hace incidir sobre un material, se genera un calentamiento en dicha superficie, esta variación de temperatura se propaga al gas que rodea dicha superficie, con lo cual su índice de refracción (n) es función de la temperatura y del calor generado en el material, un haz de luz (haz sonda) que se propague por el aire y que pase a través de la zona cuyo índice de refracción sea afectado, sufrirá una desviación periódica. La de lente térmica se basa en la medición de las fluctuaciones periódicas en la desviación del haz sonda (Bernal-Alvarado et al., 2003; Jiménez-Pérez, Cruz-Orea, Lomelí Mejía y Gutierrez-Fuentes, 2009).

Fotoacústica

La fotoacústica se basa en la generación de sonido en un dispositivo denominado celda fotoacústica, a partir de la absorción de radiación modulada y su posterior conversión en calor. Como el calentamiento es de forma modulada, se producen en el interior del material fluctuaciones periódicas de temperatura, denominadas ondas térmicas. La celda fotoacústica consiste en una cavidad cilíndrica, sellada en un extremo por el material bajo estudio y acoplada a un micrófono (Balderas-López et al., 1999). Cuando el aire interior de la celda es calentado se produce una fluctuación de presión a la frecuencia de modulación en las ondas térmicas en el material bajo estudio. Actualmente se esta técnica se ha probado con diferentes compuestos puros, y se han reportado estudios con aceites esenciales demostrando excelentes resultados (Balderas-Lopez, Monsivais Alvarado, Galvez Coyt, Muñoz Diosdado, y Díaz Reyes, 2013; Carbajal-Valdez et al., 2017; Lara-Hernandez et al., 2018).

Espectroscopia fotopiroeléctrica

Los experimentos de la espectroscopia fotopiroeléctrica se realizan por medio de la irradiación modulada. En donde son utilizados los detectores piroeléctricos, que basan su funcionamiento en el efecto piroeléctrico, el cual consiste en el cambio de polaridad debido a fluctuaciones en la temperatura. Dichos cambios producen el desplazamiento de iones positivos con respecto a iones negativos, con lo cual cierto material se polariza eléctricamente. Su forma de operación se basa en la polarización eléctrica a causa de una variación de temperatura.

Estas técnicas no destructivas han sido empleadas con el fin de la medición y detección de cambios de parámetros térmicos de los mate-

riales (capacidad calorífica, conductividad térmica, difusividad y efusividad térmicas). Estos cambios podrían deberse a su composición y el cambio en su estructura del material.

Entre las TF, la espectroscopia fotopiroeléctrica se ha convertido en uno de los métodos de caracterización de materiales más utilizada en la actualidad, en donde se pueden encontrar investigaciones que van desde semiconductores hasta tejido humano (Balderas-López y Mandelis, 2020; Caerels, Glorieux, y Thoen, 1998; Jiménez-Pérez et al., 2012).

Los métodos calorimétricos fotopiroeléctricos son técnicas precisas que hacen uso de piroeléctricos como detectores, así la temperatura media del material de muestreo es prácticamente equivalente a la temperatura de fondo continua. Una herramienta de este tipo de técnicas se basa en la excitación térmica generada ópticamente, la cual asegura el desacoplamiento térmico y mecánico de la célula de medición. Lo que simplifica en gran medida el modelo matemático utilizado para describir la propagación, a través del sistema multicapa que contiene el material de la muestra y el sensor piroeléctrico. Por lo tanto, se obtiene una alta precisión de la aproximación de propagación de las ondas térmicas unidimensionales.

Aplicaciones de las técnicas fototérmicas en el área de energía

Biodiesel

Se sabe que la energía del mundo se ha obtenido a partir de las reservas fósiles de petróleo y gas natural. Pero debido a su ya previsible agotamiento, el empleo de otras alternativas de generación de energía es investigado. El biodiesel es un carburante obtenido a partir fuentes biológicas (aceites vegetales y animales). Los aceites precursores son transformados en biodiesel por medio de un proceso de transesterificación. La utilización de las TF ha sido de gran ayuda en la última década para el análisis de las propiedades de biodiesel. Las TF han sido utilizadas no solo para el estudio de biodiesel sino para el estudio de diversos aceites vegetales con potencial de ser utilizados en la producción de biodiesel. La difusividad térmica ha sido obtenida a partir de diversas técnicas tales como lente térmica (Carbajal-Valdez et al., 2017; Ventura et al., 2018), fotopiroeléctrica inversa (Gallardo-Hernández et al., 2017; Zanelato et al., 2015), celda fotoacústica abierta (Carbajal-Valdez et al., 2017), cavidad de resonancia térmica.

En la literatura es posible encontrar diversos estudios relacionados con las propiedades de biodiesel, tales como su conductividad térmica, difusividad y efusividad térmica todas ellas medidas a partir de las diferentes configuraciones fototérmicas. Es de resaltar que se pueden medir no solo propiedades térmicas, sino que es posible detectar diversos compuestos producto de la combustión del biodiesel tales como el óxido nitroso o dióxido de carbono (Linhares et al., 2019; Rocha et al., 2014). La literatura muestra que para este tipo de muestras las diferentes técnicas fototérmicas pueden alcanzar errores de medición menores al 1% T. La Tabla 1, muestra propiedades térmicas de aceites vegetales y biodiéselos de acuerdo con las diferentes técnicas empleadas.

Tabla 1. Técnicas fototérmicas empleadas en la medición de propiedades térmicas de biodiesel y aceites vegetales utilizados como precursores de biodiesel.

Muestras	Propiedad térmica	Técnica empleada	Referencia
Aceite de: Limón, Naranja, uva;	Efusividad térmica	Celda fotoacústica abierta	(Carbajal-Valdez et al., 2017)
Biodiesel B100, S-10 and S-500; aceite de: limón, naranja, uva;	Difusividad térmica	Lente térmica	(Carbajal-Valdez et al., 2017; Zanelato et al., 2015)
Aceite motor/Jatropha; aceite de oliva; aceite de jojoba	Difusividad térmica	Cavidad de resonancia térmica	(Gallardo-Hernández et al., 2017; Lara-Hernandez et al., 2018; Lara-Hernández, Flores-Cuautle, Hernandez-Aguilar, Suaste-Gómez, & Cruz-Orea, 2017)
aceite motor/Jatropha; Biodiesel basado en grasa animal	Efusividad térmica	Fotopiroeléctrico inverso	(Gallardo-Hernández et al., 2017; Zanelato et al., 2015)
Diesel/biodiesel	*N ₂ O	Espectroscopia fotoacústica	(Linhares et al., 2019; Rocha et al., 2014)
Diesel	*CO ₂	Celda fotoacústica	(Mothe et al., 2010)

* Estos compuestos no son propiedades térmicas, sin embargo, pueden ser detectados por medio de TF.

Conductividad térmica en nanofluidos

La transferencia de energía térmica es útil en diversas aplicaciones relacionadas con el ahorro energético, en particular el incremento de la conductividad térmica por medio del uso de nanopartículas metálicas es uno de los estudios más prometedores. Se denominan nanofluidos a aquellos fluidos a los cuales se les han agregado nanopartículas. La adición de nanopartículas se lleva a cabo con diferentes propósitos en particular para modificar sus propiedades térmicas, propiedades viscoelásticas entre otras (Kouyaté et al., 2015). Mediante la utilización de técnicas fototérmicas se han logrado determinar distintas características de nanofluidos tales como: absorción de radiación solar, alta transferencia de calor, viscosidad entre otras. Para el caso del sector de energía el interés se ha concentrado en la propiedad de conductividad térmica que es el parámetro más importante responsable del mejoramiento de la transferencia de calor (Khanafar y Vafai, 2011). Son muy llamativas las distintas aplicaciones que se generan con materiales con una alta conductividad térmica, como por ejemplo en reactores nucleares o en la utilización de nanopartículas de óxido metálico (NPs) utilizada para la fabricación de superconductores (Noroozi, Zakaria, Moksini, y Wahab, 2012). La Tabla 2, muestra algunos de los nanofluidos caracterizados mediante la TF.

Las aplicaciones para la captación de energía solar merecen ser mencionadas aparte debido al incremento en el número de publicaciones relacionadas con esta área. En captación de energía solar la conductividad térmica, así como la conversión fototérmica son estudiadas debido a su influencia en la absorción de radiación solar.

Tabla 2. Propiedades térmicas y técnicas fototérmicas empleadas en la medición de propiedades térmicas Nanofluidos.

Tipo de nanofluido	Propiedad térmica	Técnica empleada	Referencia
Nanoalambres de plata, Oro	Difusividad	Cavidad de resonancia térmica	(Carbajal-Valdez et al., 2019; López-Muñoz, Pescador-Rojas, Ortega-Lopez, Salazar, & Balderas-López, 2012)
Nanoalambres de plata; Óxido de titanio; Cobre	Efusividad	Celda fotoacústica	(Carbajal-Valdez et al., 2019; Nisha, Jayalakshmy, & Philip, 2013)
Oxido de titanio; Cobre	Conductividad	Fotopiroeléctrico	(Nisha et al., 2013)
Oxido de Silicio, Oxido de titanio	Difusividad	Lente térmica	(Jiménez-Pérez et al., 2012)
Oxido de Silicio, Oxido de titanio	Efusividad	Fotopiroeléctrico	(Jiménez-Pérez et al., 2012)

Captación de energía mediante materiales de cambio de fase

Sumando a la investigación de sus distintas aplicaciones de las TF, está en el estudio de los materiales de cambio de fase mediante las técnicas de fotoacústica empleadas en la TF (Verstraeten, Van Humbeek, Wevers, y Glorieux, 2013), poniendo énfasis en su característica de transferencia de calor, que es utilizada en el almacenamiento temporal de energía térmica para su posterior empleo en bioclima, plantas de energía solar, entre otras (Zalba, Marín, Cabeza y Mehling, 2003). En el caso de energía se tienen varias vertientes; almacenamiento de energía sensible que funciona por medio de la elevación de la temperatura de un sólido o líquido en donde la cantidad de calor almacenado depende del calor específico del medio, cambio de temperatura y la cantidad de material almacenado. Para el caso almacenamiento de calor latente, es en función de la absorción o liberación de calor cuando un material de almacenamiento experimenta un cambio de fase de sólido a líquido o líquido a gas o viceversa (Garay-Ramírez, Cruz-Orea, y San Martín-Martínez, 2015; Garay Ramirez, Glorieux, San Martín Martínez, y Flores Cuautle, 2014).

Otra de las aplicaciones de las TF es en la investigación de materiales termoeléctricos, los cuales tiene la peculiaridad de transformar energía calorífica en energía eléctrica (a través del efecto Seebeck). Este tipo de experimentaciones se realizan por medio de la espectroscopia fotopiroeléctrica (Pandya et al., 2018).

Discusión y perspectivas

El uso de las técnicas fototérmicas se ha incrementado en los últimos años, una búsqueda en scopus revela un incremento consistente en la última década al pasar de mil 23 artículos en 2010 a 4 mil 532 en 2019. Del total de artículos mencionados alrededor del 50% correspon-

den a trabajos relacionados con el área energética. Es de esperar que el incremento de publicaciones relacionadas con técnicas fototérmicas continúe incrementándose, esto debido a su uso como herramienta para la caracterización térmica de materiales. Otro aspecto importante en el incremento de publicaciones relacionadas con esta área tiene que ver con el desarrollo de nuevos montajes experimentales y de nuevas aplicaciones de estas técnicas.

Por otro lado, el uso de las técnicas fototérmicas ha sumado a resolver problemas científicos, tales como el grado de influencia de nanopartículas en la modificación de la conductividad térmica en nanofluidos entre otros. Así mismo el uso de las TF se ha extendido a otros campos no menos importantes, tales como la salud, en donde el uso de estas técnicas permite obtener imágenes de alto contraste, así como el monitoreo de glucosa entre otros. Con base en lo anterior es de esperar un crecimiento importante de esta área de investigación.

Conclusiones

El uso de las TF para la caracterización de los materiales líquidos, sólidos y gases se han ido incrementado, mejorando la precisión de las mediciones y, aumentando las capacidades de estas técnicas para medir no solo propiedades térmicas sino detectando diversos compuestos. El estudio de los biocombustibles se ha visto beneficiado del uso de las TF para determinar las propiedades térmicas de los mismos. Se ha favorecido el estudio propiedades térmicas en aceites vegetales como precursores de biocombustibles originando una mayor variedad de materia prima para el desarrollo de biocombustibles. El uso de TF ha propiciado obtener un mayor conocimiento sobre transferencia de calor en el caso del análisis de biocombustibles.

Por otro lado, la detección de nanopartículas en nanofluidos ha alcanzado niveles de detección menores al 0.1 % de concentración. El uso de nanopartículas, así como de materiales de cambio de fase han mejorado la transferencia de calor con la consecuente mejora en la generación de energía eléctrica por medio de la captación de energía solar.

Símbolos

CTR	Coefficiente de termoreflexión
T	Temperatura
TF	Técnicas Fototérmicas
PCM	Materiales de cambio de fase
V	Volts
	Potencia

Bibliografía

1. Balderas-Lopez, J., Monsivais Alvarado, T., Galvez Coyt, G., Muñoz Diosdado, A. y Diaz Reyes, J. (2013). *Thermal characterization of vegetable oils by means of photoacoustic techniques. Revista Mexicana de Fisica*, 59(1), 5.
2. Balderas-López, J. A., Gutiérrez-Juárez, G., Jaime-Fonseca, M. R., y Sánchez-Sinencio, F. (1999). *Measurements of thermal effusivity of liquids using a conventional photoacoustic cell. Review of Scientific Instruments*, 70(4), 2069-2071. doi:10.1063/1.1149713
3. Balderas-López, J. A. y Mandelis, A. (2020). *Photopyroelectric Spectroscopy of Pure Fluids and Liquid Mixtures: Foundations and State-of-the-Art Applications. International Journal of Thermophysics*, 41(6), 78. doi:10.1007/s10765-020-02662-3
4. Bernal-Alvarado, J., Mansanares, A. M., Silva, E. C. d. y Moreira, S. G. C. (2003). *Thermal diffusivity measurements in vegetable oils with thermal lens technique. Review of Scientific Instruments*, 74(1), 697-699. doi:10.1063/1.1517726
5. yCaerels, J., Glorieux, C. y Thoen, J. (1998). *Absolute values of specific heat capacity and thermal conductivity of liquids from different modes of operation of a simple photopyroelectric setup. Review of Scientific Instruments*, 69(6), 2452-2458. doi:10.1063/1.1148973
6. Carbajal-Valdez, R., Jiménez-Pérez, J. L., Cruz-Orea, A., Correa-Pacheco, Z. N., Alvarado-Noguez, M. L., Romero-Ibarra, I. C., & Mendoza-Alvarez, J. G. (2017).

Thermal properties of centrifuged oils measured by alternative photothermal techniques. Thermochemica Acta, 657(Supplement C), 66-71. doi:https://doi.org/10.1016/j.tca.2017.09.014

7. Carbajal-Valdéz, R., Rodríguez-Juárez, A., Jiménez-Pérez, J. L., Sánchez-Ramírez, J. F., Cruz-Orea, A., Correa-Pacheco, Z. N., . . . Luna-Sánchez, J. L. (2019). Experimental investigation on thermal properties of Ag nanowire nanofluids at low concentrations. *Thermochemica Acta*, 671, 83-88. doi:https://doi.org/10.1016/j.tca.2018.11.015

8. Figura, L. y Teixeira, A. A. (2007). *Food Physics: Physical Properties - Measurement and Applications: Springer Berlin Heidelberg*.

9. Flores Cuautle, J. J. A., Suaste Gomez, E. y Cruz Orea, A. (2009). Photopyroelectric detection based on PLZT ceramic. Paper presented at the International Conference on Photoacoustic and Photothermal Phenomena, Leuven, Belgium.

10. Flores Cuautle, J. J. A., Suaste Gomez, E. y Cruz Orea, A. (2011). Photopyroelectric Microscopy on Porous Ceramics. Paper presented at the International Conference on Photoacoustic and Photothermal Phenomena, Merida, Mexico.

11. Gallardo-Hernández, E. A., Lara-Hernández, G., Nieto-Camacho, F., Domínguez-Pacheco, A., Cruz-Orea, A., Hernández-Aguilar, C., . . . Flores-Cuautle, J. J. A. (2017). Thermal and Tribological Properties of *Jatropha* Oil as Additive in Commercial Oil. *International Journal of Thermophysics*, 38(4), 54. doi:10.1007/s10765-017-2185-y

12. Garay-Ramírez, B., Cruz-Orea, A. y San Mar-

tin-Martínez, E. (2015). Effect of Silver Nanoparticles on the Thermal Properties of Sodium Acetate Trihydrate. *International Journal of Thermophysics*, 1-9. doi:10.1007/s10765-015-1837-z

13. Garay Ramirez, B. M. L.; Glorieux, C.; San Martin Martinez, E. y Flores Cuautle, J. J. A. (2014). Tuning of thermal properties of sodium acetate trihydrate by blending with polymer and silver nanoparticles. *Applied Thermal Engineering*, 62(2), 838-844. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.09.049

14. Glorieux, C.; Van de Rostyne, K.; Goossens, J.; Shkerdin, G.; Lauriks, W. y Nelson, K. A. (2006). Shear properties of glycerol by interface wave laser ultrasonics. *Journal of applied physics*, 99(1), 013511. doi:doi:http://dx.doi.org/10.1063/1.2150257

15. Guo, X.; Mandelis, A. y Zinman, B. (2012). Noninvasive glucose detection in human skin using wavelength modulated differential laser photothermal radiometry. *Biomedical Optics Express*, 3(11), 3012-3021. doi:10.1364/BOE.3.003012

16. Gusev, V.; Desmet, C.; Lauriks, W.; Glorieux, C. y Thoen, J. (1996). Theory of Scholte, leaky Rayleigh, and lateral wave excitation via the laser-induced thermoelastic effect. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 100(3), 1514. doi:10.1121/1.416021

17. Hatori, K.; Taketoshi, N.; Baba, T. y Ohta, H. (2005). Thermoreflectance technique to measure thermal effusivity distribution with high spatial resolution. *Review of Scientific Instruments*, 76(11), 114901. doi:10.1063/1.2130333

18. Jiménez-Pérez, J. L., Cruz-Orea, A., Lomeli Mejía, P. y Gutierrez-Fuentes, R. (2009). Monitoring the Thermal Parameters of Different Edible Oils by Using Thermal Lens Spectrometry. *International Journal of Thermophysics*, 30(4), 1396-1399. doi:10.1007/s10765-009-0628-9
19. Jiménez-Pérez, J. L., Sánchez-Ramírez, J. F., Cornejo-Monroy, D., Gutierrez-Fuentes, R., Pescador Rojas, J. A., Cruz-Orea, A., . . . Jacinto, C. (2012). Photothermal Study of Two Different Nanofluids Containing SiO₂ and TiO₂ Semiconductor Nanoparticles. *International Journal of Thermophysics*, 33(1), 69-79. doi:10.1007/s10765-011-1139-z
20. Khanafar, K. y Vafai, K. (2011). A critical synthesis of thermophysical characteristics of nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54(19), 4410-4428. doi:https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.04.048
21. Kouyaté, M., Flores-Cuautle, J. J. A., Slenders, E., Sermeus, J., Verstraeten, B., Garay Ramirez, B. M. L., . . . Glorieux, C. (2015). Study of Thermophysical Properties of Silver Nanofluids by ISS-HD, Hot Ball and IPPE Techniques. *International Journal of Thermophysics*, 1-11. doi:10.1007/s10765-015-1985-1
22. Kusiak, A., Ch, P. y Battaglia, J. L. (2010). Measuring the thermal conductivity of liquids using photo-thermal radiometry. *Measurement Science and Technology*, 21(1), 015403.
23. Lara-Hernandez, G., Benavides-Parra, J. C., Cruz-Orea, A., Contreras-Gallegos, E., Hernández-Aguilar, C. y Flores-Cuautle, J. J. A. (2018). Thermal characterization of castor oil as additive in lubricant oil using photothermal techniques. *Superficies y vacío*, 31, 6-9.
24. Lara-Hernández, G., Flores-Cuautle, J. J. A., Hernández-Aguilar, C., Suaste-Gómez, E. y Cruz-Orea, A. (2017). Thermal Properties of Jojoba Oil Between 20° C and 45° C. *International Journal of Thermophysics*, 38(8), 115. doi:10.1007/s10765-017-2252-4
25. Lara-Hernández, G., Suaste-Gómez, E., Cruz-Orea, A., Mendoza-Alvarez, J. G., Sánchez-Sinencio, F., Valcárcel, J. P. y García-Quiroz, A. (2013). Thermal Characterization of Edible Oils by Using Photopyroelectric Technique. *International Journal of Thermophysics*, 34(5), 962-971. doi:10.1007/s10765-013-1419-x
26. Lara Hernandez, G., Hernández Aguilar, C., Cruz Orea, A., Arias Duque, N. P., Wilches Torres, M. A. y Flores Cuautle, J. J. A. (2020). Wheat germ, mamey seed, walnut, coconut, and linseed oil thermal characterization using photothermal techniques. *Revista Mexicana de Física*, 66(2), 5.
27. Linhares, F. G., Lima, M. A., Mothe, G. A., de Castro, M. P. P., da Silva, M. G. y Sthel, M. S. (2019). Photoacoustic spectroscopy for detection of N₂O emitted from combustion of diesel/beef tallow biodiesel/sugarcane diesel and diesel/beef tallow biodiesel blends. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 9(3), 577-583. doi:10.1007/s13399-019-00372-x
28. Lopez-Munoz, G., Pescador-Rojas, J., Ortega-Lopez, J., Salazar, J. y Balderas-Lopez, J. (2012). Thermal diffusivity measurement of spherical gold nanofluids of different sizes/concentrations. *Nanoscale Research Letters*, 7(1), 423.
29. López-Muñoz, G. A., Pescador-Rojas, J. A., Ortega-Lopez, J., Salazar, J. S. y Balderas-López, J. A. (2012). Thermal diffusivity measurement of spherical gold nanofluids of different sizes/concentrations. *Nanoscale Research Letters*, 7(1), 423. doi:10.1186/1556-276X-7-423
30. Mandelis, A. y Zver, M. M. (1985). Theory of photopyroelectric spectroscopy of solids. *Journal of applied physics*, 57(9), 4421-4430.
31. Mendoza, P. J. y Rodriguez, M. E. (2001). Obtención de imágenes térmicas y termoelectrónicas mediante Radiometría Fototérmica Infrarroja. *Superficies y vacío*, 12, 5.

32. Mothe, G., Castro, M., Sthel, M., Lima, G., Brasil, L., Campos, L., . . . Vargas, H. (2010). Detection of Greenhouse Gas Precursors from Diesel Engines Using Electrochemical and Photoacoustic Sensors. *Sensors*, 10(11), 9726-9741. doi:<http://dx.doi.org/10.3390/s101109726>
33. Nisha, M. R., Jayalakshmy, M. S. y Philip, J. (2013). Effective thermal conductivity of condensed polymeric nanofluids (nanosolids) controlled by diffusion and interfacial scattering. *Pramana*, 81(5), 849-864. doi:10.1007/s12043-013-0605-5
34. Noroozi, M., Zakaria, A., Moksini, M. M. y Wahab, Z. A. (2012). An investigation on the thermal effusivity of nanofluids Containing Al₂O₃ and CuO nanoparticles. *International journal of molecular sciences*, 13(8), 10350-10358. doi:10.3390/ijms130810350
35. Pandya, S., Wilbur, J., Kim, J., Gao, R., Dasgupta, A., Dames, C. y Martin, L. W. (2018). Pyroelectric energy conversion with large energy and power density in relaxor ferroelectric thin films. *Nature Materials*, 17(5), 432-438. doi:10.1038/s41563-018-0059-8
36. Rocha, A. M., Sthel, M. S., de Castro, M. P. P., Mothé, G. A., Silva, W. C., Perez, V. H., . . . Vargas, H. (2014). Evaluation of Nitrous Oxide Emitted from Diesel/Biodiesel Blends during Combustion in a Diesel Engine at Laboratory Scale by a Photoacoustic Spectroscopy Technique. *Energy & Fuels*, 28(6), 4028-4032. doi:10.1021/ef500294a
37. Salazar, A., Sánchez-Lavega, A., Terrón, J. M. y Gateshki, M. (2000). Aplicación de las técnicas fototérmicas al estudio de materiales.
38. Terhoeven-Urselmans, T., Schmidt, H., Georg Joergensen, R. y Ludwig, B. (2008). Usefulness of near-infrared spectroscopy to determine biological and chemical soil properties: Importance of sample pre-treatment. *Soil Biology and Biochemistry*, 40(5), 1178-1188. doi:<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.12.011>
39. Ventura, M., Deus, W. B., Silva, J. R., Andrade, L. H. C., Catunda, T. y Lima, S. M. (2018). Determination of the biodiesel content in diesel/biodiesel blends by using the near-near-infrared thermal lens spectroscopy. *Fuel*, 212, 309-314. doi:<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.10.069>
40. Verstraeten, B., Van Humbeeck, J., Wevers, M. y Glorieux, C. (2013). Thermoelastic Characterization of Changing Phase Distribution in Hardened Steel by Laser Ultrasonics. *International Journal of Thermophysics*, 34(8), 1754-1761. doi:10.1007/s10765-013-1405-3
41. Xu, X., Flores Cuautle, J. J. A., Kouyate, M., Roozen, N. B., Goossens, J., Menon, P., . . . Serfaty, S. (2016). Evolution of elastic and thermal properties during TMOS-gel formation determined by ringing bottle acoustic resonance spectroscopy, impulsive stimulated scattering, photopyroelectric spectroscopy and the hot ball method. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 49(8), 085502.
42. Zalba, B., Marín, J. M., Cabeza, L. F. y Mehling, H. (2003). Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering*, 23(3), 251-283. doi:[https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(02\)00192-8](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(02)00192-8)
43. Zanelato, E. B., Machado, F. A. L., Rangel, A. B., Guimarães, A. O., Vargas, H., da Silva, E. C. y Manzanares, A. M. (2015). Investigation of Biodiesel Through Photopyroelectric and Dielectric-Constant Measurements as a Function of Temperature: Freezing/Melting Interval. *International Journal of Thermophysics*, 36(5), 924-931. doi:10.1007/s10765-014-1656-7