

BIODIESELS ALTERNATIVOS CON NANOPARTÍCULAS PARA EL USO EN SISTEMAS DE INGENIERÍA TÉRMICA

**Genaro López Gamboa¹, José Luís Jiménez Pérez^{2*},
Rubén Gutiérrez Fuentes³, Zormy Nacary Correa Pacheco⁴,
Jose Francisco Sánchez-Ramírez⁵, Alfredo Cruz Orea⁶**

¹Instituto Tecnológico de Toluca. Avenida Tecnológico S/N. Colonia Agrícola Bellavista Metepec, Estado de México. CP 52149, México.

²Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas-Instituto Politécnico Nacional, Av. IPN, No. 2580, Col. Barrio la Laguna Ticomán, Gustavo A. Madero, Ciudad de México. CP 07340, México.

³Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Ciudad Cuauhtémoc, Av. Tecnológico # 137, Ciudad Cuauhtémoc, Chihuahua. CP 31500, México.

⁴CONACYT-Centro de Desarrollo de Productos Bióticos, Instituto Politécnico Nacional, Carretera Yautepec-Jojutla, km 6, calle CEPROBI, No. 8, San Isidro, Yautepec, Morelos. CP 62731, México.

⁵CIBA-Instituto Politécnico Nacional, Ex-Hacienda San Juan Molino Carretera Estatal Tecuexcomac-Tepetitla Km 1.5, Tlaxcala. CP 90700, México.

⁶Departamento de Física, CINVESTAV-IPN, Av. Instituto Politécnico Nacional, No. 2508, Col. San Pedro Zacatenco, Ciudad de México. CP 07360, México.

López Gamboa, G., Jiménez Pérez, J. L., Gutiérrez Fuentes, R., Correa Pacheco, Z. N., Sánchez-Ramírez, J. F., & Cruz Orea, A. (2021). Biodiesels alternativos con nanopartículas para el uso en sistemas de ingeniería térmica. En E. San Martín-Martínez (Ed.), *Avances de investigación en Nanociencias, Micro y Nanotecnologías. Volumen III* (pp. 15-46). Barcelona, España: Omniascience.

Resumen

En las últimas décadas los biodiesels surgen debido a la falta de combustibles y a las condiciones ambientales, considerándose éstos como una energía alternativa para posibles aplicaciones en colectores e intercambiadores de energía limpia. Recientemente se han incorporado nanopartículas metálicas a los biodiesel en diferentes concentraciones, tamaño y suspensiones. La importancia y novedad de los nanolíquidos se debe a que tienen diferentes aplicaciones en sistemas de ingeniería térmica como enfriadores de paneles solares, en radiadores de motor, almacenadores de energía, sistemas solares térmicos, estanques y celdas solares termoeléctricas, etc. El objetivo de este trabajo es el estudio de biodiesels con diferentes nanopartículas metálicas para el mejoramiento del transporte aplicando las técnicas fototérmicas para estudiar el transporte de calor y conocer las propiedades térmicas del nanobiodiesel tales como la difusividad, la efusividad y la conductividad térmicas. Finalmente, se desarrolló un circuito cerrado simulando un radiador de carro, usando diferentes líquidos base que afectan la transferencia de calor con posibles aplicaciones en dispositivos intercambiadores de calor en circuitos cerrados.

Palabras clave: Nanopartículas, biodiesel, nanofluido , circuitos cerrados, técnicas fototérmicas.

1. Introducción

Fundamentalmente, la conversión de energía y transporte de calor ocurren a niveles atómicos o moleculares; debido a ello es de esperar que la nanociencia y la nanotecnología jueguen un papel significativo en revitalizar la industria, al ser la transferencia de calor crucial en los sistemas cerrados, siendo la conductividad térmica (k en W/mK) el factor principal para modificar la baja conductividad térmica de fluidos convencionales, como el agua, aceite mineral, aceite vegetal, y etileno-glicol, etc. La conductividad térmica representa una limitación primaria en el desarrollo de sistemas cerrados eficientes para la transferencia de calor [1]. Una forma de mejorar la conductividad térmica de un fluido en específico es suspender nanopartículas (NPs, por las siglas en inglés de nanoparticles) sólidas en él, con la finalidad de modificar el transporte, flujo y transferencia de calor en el mismo [2]. Los NFs han atraído mucha atención en años recientes, debido a que sus dimensiones y propiedades son dependientes de su forma y estructura, ya que un fluido mezclado con NPs tiene un alto grado de conductividad térmica. Se han realizado muchos análisis de fluidos mezclados con NPs de oro (Au) y plata (Ag); sin embargo, hasta ahora hay pocos trabajos reportados de NFs formados por biodiesel y NPs de Au y Ag. Existen muchas aplicaciones de los NFs que se han reportado en la literatura como fluidos de transferencia de calor o HTF (por las siglas en Inglés: Heat Transfer Fluid) [3], refrigerantes/anticongelantes en automoviles[4], refrigerantes en proceso de maquinado (corte y fresado) [5], en sistemas de aire acondicionado [6], enfriamiento en sistemas militares, incluyendo vehículos militares, submarinos y láseres diodo de alta potencia [7] y sistemas de refrigeración doméstica [8].

La k de los nanofluidos es una propiedad termofísica clave, la cual depende de: tamaño de las NPs, temperatura y de las propiedades termo-físicas del fluido base. En los últimos años se han reportado muchas investigaciones sobre la k de NFs, y al mismo tiempo se han propuesto un número considerable de modelos teóricos para la predicción de la k de los NFs la mayoría de estos modelos no han sido capaces de predecir adecuadamente la k de la variedad de NFs que existen, como ejemplos de estos modelos son los siguientes: Maxwell (M) y Hamilton-Crosser (HC). Estos modelos teóricos se basan en la teoría clásica de compuestos y mezclas conteniendo partículas del orden de milímetros o micrómetros; sin embargo, se ha demostrado en diferentes investigaciones que no son adecuados para predecir la k de los NFs, debido principalmente a que estos modelos toman en consideración solamente el efecto de la concentración de NPs. Para evitar la

situación anterior muchos investigadores han enfocado su atención en el uso de las redes neurales artificiales o ANNs (por las siglas en Inglés de Artificial Neural Networks) para la predicción de la k en NFs, y los resultados han dado un alto grado de consistencia entre los datos experimentales y los valores teóricos utilizando ANNs [9].

Las nobles propiedades de los nanomateriales provienen de la razón área superficial/ volumen. Las propiedades térmicas, mecánicas, ópticas, magnéticas y eléctricas de materiales nanométricos son superiores que las que presentan los materiales en bulto [10].

Por otra parte, el biodiesel ha ganado popularidad respecto a los combustibles fósiles hoy en día, debido a sus propiedades amigables con el medio ambiente, por ejemplo: menor producción de humo y partículas, mayor octanaje, origen doméstico, menores emisiones de monóxido de carbono e hidrocarburos. También son biodegradables, no tóxicos y proporcionan lubricación a los automotores contra el diesel que es bajo en sulfuro y son semitransparentes [11].

En este trabajo de investigación se obtuvieron las propiedades fototérmicas de NFs (biodiesel de aceite vegetal mezclado con NPs de Au y Ag en diferentes concentraciones) utilizando las técnicas fototérmicas (o PTTs, por las siglas en inglés de photo thermal techniques) siguientes: espectroscopía de Lente Térmica (o TLS, por las siglas en inglés de thermal lens spectroscopy) para obtener la difusividad térmica o D (por la sigla en inglés de diffusivity) con unidades de medida en m^2/s ; espectroscopía de fotopiroeléctrico inverso o IPPES (por las siglas en inglés de inverse photo pyro electric spectroscopy) para obtener la efusividad térmica o e (por la sigla en inglés de effusivity) con unidades de medida en $Ws^{1/2}/m^2K$; espectroscopía de Fotoacústica (o PAS, por las siglas en inglés de photo acoustics spectroscopy) para obtener (al igual que la IPPES) la e de los nanofluidos estudiados. Por último, en la investigación de este trabajo se propone un reservatorio de una prueba preliminar con diferentes líquidos y anticongelantes para el registro de la temperatura, que permita determinar la transferencia de calor a través de un sistema cerrado parecido a un sistema de circulación de enfriamiento de un motor conveccional.

2. Experimental

En cuanto a los materiales utilizados para crear los NFs se utilizaron tres tipos de biodiesel: uno llamado C4 por la empresa que lo elabora (Biofuels de

México S.A de C.V.) el cual es un biodiesel que se sintetiza a partir de desechos de aceites vegetales: biodiesel de soya (BS) y de jatrofa (BJ), que se obtuvieron a partir de aceite vegetal de soya y jatrofa, respectivamente, utilizando el método de “Transesterificación”.

Las NPs utilizadas en este proyecto fueron de Au y Ag que se obtuvieron utilizando el método de “Reducción Química”.

Cabe mencionar que una vez que se obtuvieron tanto el biodiesel como las NPs de Au y Ag se sintetizaron los NFs mediante el proceso denominado de “Dos Pasos”. Este método consiste en sintetizar por separado la fase líquida (biodiesel) y la fase sólida (NPs) y después se dispersan las NPs en el fluido base a una concentración deseada [12].

2.1. Síntesis de Biodiesel de Aceite Vegetal de Soya y Jatrofa

En este proyecto se sintetizó biodiesel a partir de aceite de soya y de aceite de jatrofa mediante el método de transesterificación, siguiendo el mismo procedimiento reportado por Encinar y colaboradores [13]. La reacción de transesterificación se llevó a cabo en un reactor esférico de 500 mL, al mismo que se le instaló un termómetro y un sistema para condensación; se situó este reactor sobre una parrilla con agitador magnético, se agregaron 200 mL de aceite vegetal de soya y se ajustó la temperatura de la parrilla a 60 °C, en un vaso de precipitado se colocó 40 mL de alcohol (metanol) y 0.7 g de NaOH, se agitó esta mezcla hasta llegar a la homogeneidad; una vez que el aceite llegó a la temperatura de 60 °C, se vació el metóxido de sodio (metanol + NaOH) dentro del reactor y se provocó la agitación magnética durante 4 horas, una vez pasado este tiempo se dejó reposar el contenido en el reactor hasta su enfriamiento a temperatura ambiente, formándose dos capas en la reacción: la capa superior que consistió de ésteres metílicos (biodiesel) y una capa inferior de glicerina, restos de catalizador sin reaccionar y exceso de metanol. Se hizo una separación de fases y después se lavó la fase correspondiente al biodiesel con agua destilada. Se realizaron varios procesos de lavado para asegurar la eliminación de restos de catalizador. Para verificar que la síntesis de biodiesel fue efectiva, se utilizó la espectrofotometría de infrarrojo con transformada de Fourier o FTIR. En este proyecto se obtuvieron los espectros de FTIR del biodiesel C4, soya y jatrofa, los cuales son mostrados en la Figura 1A).

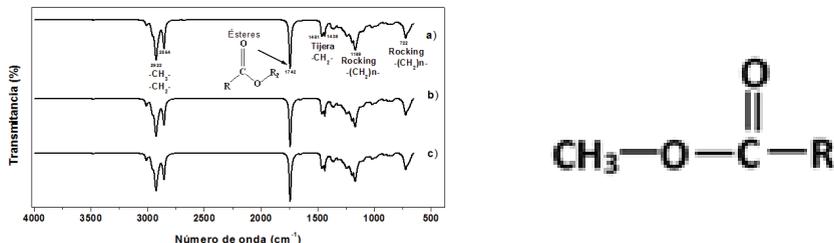


Figura 1. A) Espectros de FTIR del biodiesel: a) C4, b) soya y c) jatrofa.
B) Molécula de un éster metílico (biodiesel).

Como se puede observar en la Figura 1A, los espectros de los tres diferentes biodieseles son muy parecidos [14] mostrando un pico en 1742 cm^{-1} , el cual corresponde al grupo funcional de los ésteres; existen otros picos en 2854 , 1461 , 1436 , 1169 y 722 cm^{-1} , los cuales corresponden a cadenas largas del enlace CH_2 y el pico en 2922 cm^{-1} corresponde al grupo funcional de CH_3 . Una molécula de éster metílico (biodiesel) se muestra en la Figura 1B.

2.2. Síntesis de Nanopartículas de Ag

La síntesis de las NPs de Ag se llevo a cabo utilizando el procedimiento reportado por Gutiérrez Fuentes y colaboradores [15], procediendo como sigue: se preparó una solución acuosa con AgNO_3 (0.0013 M , 25 mL) en un vaso de precipitado, la cual fue agitada por 30 minutos. Después se agregó una solución acuosa con citrato de sodio (0.097 M , 1 mL) y se agitó esta mezcla ($\text{AgNO}_3/\text{H}_2\text{O}$ y citrato de sodio/ H_2O) por 60 minutos; pasado este tiempo, se observó que dicha solución presentó un color amarillento, el cual es característico de las NPs de Ag. Para comprobar que la síntesis de NPs de Ag fue efectiva, se utilizó un Microscopio de Transmisión Electrónica (TEM). La Figura 2, muestra una micrografía de TEM para las NPs de Ag sintetizadas por el método de reducción química.

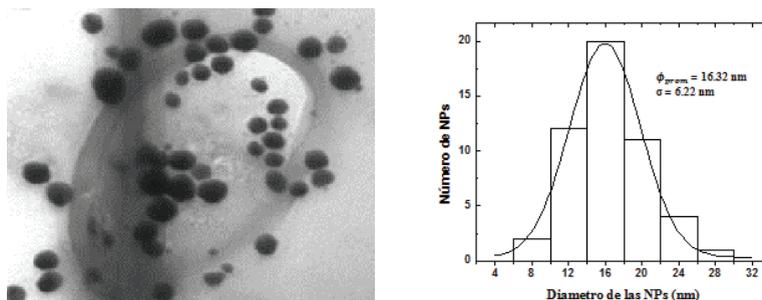


Figura 2. Micrografía de NPs de plata y la distribución de tamaño.

La Figura 2, muestra una micrografía de las NPs de Ag sintetizadas por el método de reducción química, tienen una morfología esférica, y de acuerdo con la gráfica de distribuciones de tamaños se obtuvo como promedio un diámetro de 16.32 nm, con una desviación estándar en cuanto al diámetro de las mismas de ± 6.22 nm.

2.3. Síntesis de Nanopartículas de Au

Para llevar a cabo la síntesis de NPs de Au, se siguió el procedimiento que se describe a continuación [16]: se preparó una solución, en un vaso de precipitado (22 g de docusato de sodio en 50 mL de aceite isooctano), a la par se preparó una segunda solución acuosa (9.6 mg de AuClH_3 , en 1 mL de H_2O destilada) en un segundo vaso de precipitado, la cual se sometió a agitación constante (200 rpm) por dos minutos; pasado ese tiempo, se agregaron 100 μL de docusato de sodio y se continuó con la agitación por cinco minutos más. Después se agregó un agenter reductor (5.45 μL de hidracina) y se continuó agitando por otros dos minutos; una vez hecho esto, se verificó que la solución agitada presentara un color violeta (color característico de las NPs de Au) y hecho ésto, se agregó un estabilizante (600 μL de dodecanotiol) y se continuó con la agitación por dos minutos más, dejando reposar dicha solución por quince días; pasado este tiempo, se lavó el contenido del vaso de precipitado tres veces con acetona para eliminar los restos de hidracina, dodecanotiol y docusato de sodio, para de esta manera obtener las NPs de Au. La Figura 3, muestra una micrografía de las NPs de Au sintetizadas por el método de reducción química, donde se puede apreciar que las NPs de Au sintetizadas por el método de reducción química tienen una morfología esférica y de acuerdo con la gráfica de distribuciones de tamaños se obtuvo como promedio un diámetro de 9.1 nm con una desviación estándar en cuanto al diámetro de las mismas de ± 3.4 nm.

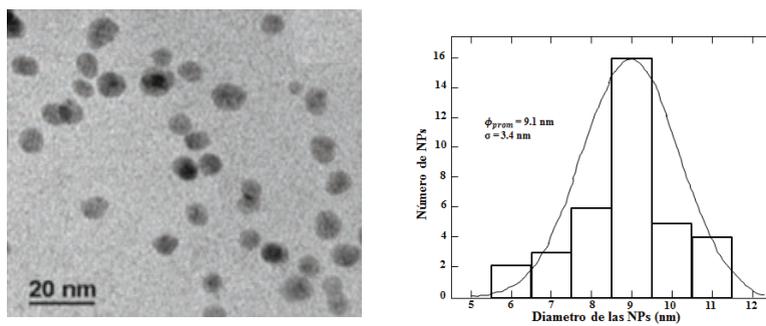


Figura 3. Micrografía de NPs de Au y la distribución de tamaño.

2.4. Preparación de Nanofluidos

En este proyecto para la preparación de los NFs se utilizó un baño ultrasónico modelo 2800 de la marca Branson, cada una de las muestras se sometió a agitación ultrasónica por una hora a 20 khz, durante la preparación [1]. Por otra parte, para obtener la absorbancia de los NFs estudiados se utilizó un espectrofotómetro Genesys 10S UV-Vis de la marca Thermo Scientific. La Figura 4A muestra el espectro de absorción de los NFs de biodiesel de C4 con NPs de oro.

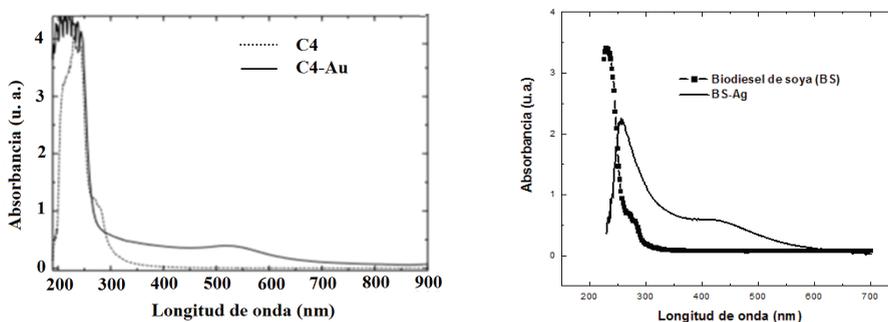


Figura 4. A) Espectro de absorción del NF de C4-Au. B) Espectro de absorción del NF de BS-Ag.

Como se aprecia en la Figura 4A, el espectro del NF en cuestión presenta una banda de absorción de ~ 450 nm a ~ 650 nm; ésto se debe primeramente a la presencia del PSR (por las siglās en inglés de Plasmon Superficial Resonance) derivado de las NPs de oro. La importancia de obtener el espectro de absorbancia de los NFs reside en el hecho de que se requiere que la muestra absorba parte de la luz incidente (532 nm); ya que esa es la longitud de onda correspondiente al láser de excitación en las técnicas fototérmicas utilizadas como son la Lente Térmica, Fotopiroeléctrico y la Fotoacústica.

La Figura 4B, muestra el espectro de absorción correspondiente al NF de biodiesel de soja con NPs de plata. De igual manera que el NF de C4-Au, la Figura 4 muestra el espectro del NF de BS-Ag y como se puede observar, este espectro presenta una banda de absorción de ~ 475 nm a ~ 550 nm, debido a la presencia del PSR relativo a las NPs de Ag.

2.5. Obtención de las Propiedades Térmicas de los NFs con las Técnicas Fototérmicas

Las PTTs a diferencia de las técnicas calorimétricas tienen la ventaja de que no son ni invasivas ni destructivas. Se caracterizan por tener un haz de láser

modulado llamado haz de excitación el cual incide en la muestra y parte de su energía es absorbida por la muestra, generando un cambio en la temperatura de la muestra, que depende del radio y del tiempo de duración de un pulso del haz de excitación; una vez que termina el pulso, se propicia la relajación del estado excitado en la muestra, ocasionándose tres cambios en la misma: cambio en su temperatura, cambio en su densidad y cambio en su presión (onda acústica); estos tres cambios a su vez ocasionan un cambio en el índice de refracción de la muestra. En la Figura 5 presenta un panorama general del principio de las PTTs.

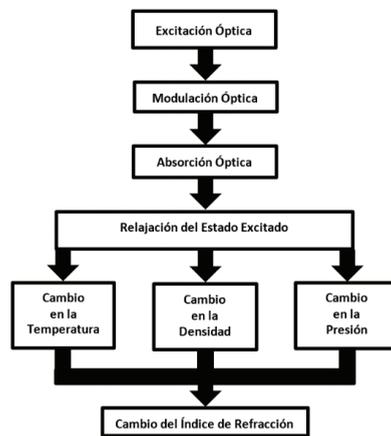


Figura 5. El principio de las Técnicas Foto-Térmicas en muestras líquidas semitransparentes.

Una vez que se obtiene la D y la e de las muestras es posible calcular la k de las muestras utilizando la Ecuación 1:

$$k = e \sqrt{D} \quad (1)$$

donde: k es la conductividad térmica (en $W/m^{\circ}C$), e es la difusividad térmica (en m^2/s) y D es la efusividad térmica (en $Ws^{1/2}/m^2K$).

2.5.1. Espectrometría de Lente Térmica

La espectrometría de Lente Térmica (o TLS, por sus siglas en inglés: thermal lens spectrometry) es una técnica que ha sido ampliamente usada para investigar las propiedades térmicas y ópticas de materiales transparentes. En aplicaciones químicas y analíticas la TLS ha demostrado ser de alta sensibilidad, con límites

de detección de dos a tres órdenes de magnitud más que los obtenidos de las técnicas de espectrofotometría convencionales. Esta técnica es ideal para la determinación de ultratrazas y la medición del espectro de absorción [17].

Se utilizan dos láseres, uno de excitación de mayor potencia (Ar^+Xe) y otro de menor potencia como láser de prueba (He-Ne). Las configuraciones experimentales poseen dos arreglos: modo acoplado [18] y desacoplado. En este arreglo, la celda de la muestra se pone en la cintura del haz de excitación, donde la densidad de potencia y el gradiente térmico del índice de refracción producido permiten observar una mejor señal [19]. El haz de prueba es enfocado fuera de la muestra, ya que en esta configuración el haz de prueba es más ancho que el de excitación. El gradiente de temperatura y el índice de refracción varían fuera del radio ω_c del haz de excitación afectando la propagación del haz de prueba, por lo que debe considerarse la naturaleza aberrante de la TL [20, 21]. La formación de la lente térmica se genera cuando incide un haz láser de excitación con perfil gaussiano TEM_{00} , en una muestra semitransparente, la muestra absorbe la energía del haz, generando calor y un gradiente de temperatura, originándose un cambio en el índice de refracción con la temperatura, creando este efecto un elemento óptico “lente-virtual”, llamada lente térmica (TL). Cuando hacemos incidir un segundo láser llamado haz de prueba en esta región, será afectado al pasar por la TL, resultando en una divergencia o convergencia, dependiendo de la naturaleza de la muestra utilizada

La ecuación característica de la TLS, está representada por:

$$I(t) = I(0) \left[1 - \frac{\theta}{2} \tan^{-1} \left(\frac{2mV}{[(1+2m)^2 + V^2](t_c/2t) + 1 + 2m + V^2} \right) \right]^2 \quad (2)$$

donde: $I(0)$, es la intensidad de la señal cuando ya sea t o θ es cero, θ es un valor proporcional a la diferencia del cambio de fase del haz de prueba, m indica el grado de desacoplamiento del haz de prueba y de excitación, V es un valor que indica la razón $V = Z_l / Z_c$ (donde Z_l distancia del centro de la muestra al plano del detector sobre el eje Z y Z_c es la distancia confocal del haz de prueba) y t_c es la constante de tiempo característica (tiempo donde se forma la lente térmica).

El montaje experimental para la TLS, se muestra en la Figura 6. El haz de excitación se ajustó a una potencia $P_e = 40\text{mW}$ con $\lambda_c = 532\text{ nm}$, y fue focalizado por una lente convergente ($f_1=10\text{ cm}$), colocando una cubeta de cuarzo (10mm) en el plano focal. La exposición de la cubeta al haz de excitación fue controlada por medio de un obturador. El haz de prueba proviene de un láser de

He-Ne ($\lambda_p = 632.8 \text{ nm}$), fue focalizado mediante una lente convergente ($f_2 = 28 \text{ cm}$), con un ángulo $\alpha < 1.5$ con respecto al haz de excitación. Los datos leídos por el detector fueron llevados a una tarjeta de adquisición de datos (Texas Instruments Modelo) y posteriormente llevados hasta una computadora mediante un programa de instrumentación virtual para su posterior análisis y ajuste.

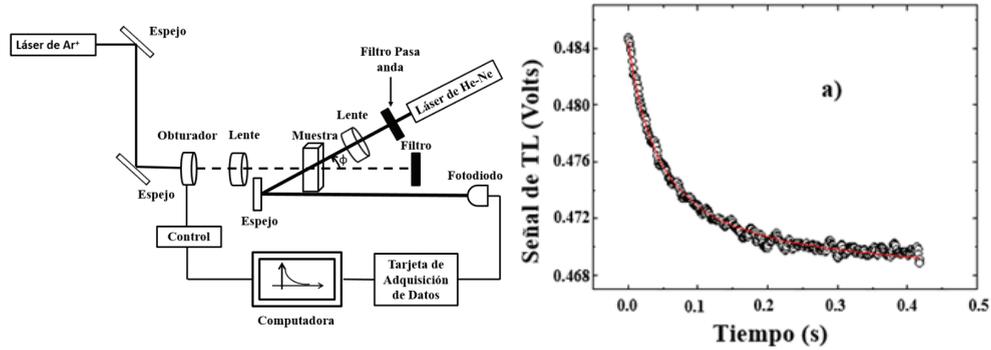


Figura 6 A). Esquema del arreglo experimental de la TL, curva característica de TL del biodiesel C4. B) Curva de TL para el biodiesel C4 (los datos experimentales están representados por círculos transparentes mientras que la línea sólida corresponde al ajuste teórico).

2.5.2. Espectrometría de Fotopiroeléctrico

En este trabajo de investigación, se utilizó la técnica de espectroscopia de fotopiroeléctrico (o IPPES, por las siglas en inglés de Inverse Photo Pyro Electric Spectroscopy) para obtener la efusividad térmica o e (por la sigla en inglés de Effusivity) del NF de biodiesel C4 mezclado con NPs de oro en diferentes concentraciones, la e esta relacionada con la D y la k ; mediante la ecuación (1).

Para obtener la e del biodiesel de C4 con NPs de oro se utilizó la ecuación característica de IPPES propuesta por Flores-Cuautle y colaboradores [22]:

$$\theta(\omega) = \frac{\left(1 - e^{-q_p l_p}\right)(1 + b) + \left(e^{-q_p l_p} - 1\right)(1 - b)}{(g + 1) e^{-q_p l_p} (1 - b) + (1 + g) e^{q_p l_p} (1 + b)} \quad (3)$$

donde; $\theta(\omega)$ es proporcional a la señal de salida del detector piroeléctrico, l_p es el espesor del detector en μm , ω es la frecuencia angular en radianes (o $2\pi f$), q_p es la relación $(j\omega/\alpha_p)^{1/2}$, α_p es el coeficiente de absorción óptica del sensor piroeléctrico, b es e_s / e_p , e_s / e_p y e_s, e_g y e_p son la e de la muestra, aire y detector respectivamente. Una vez que se corre el experimento, éste arroja como resultado al parámetro $b = e_s / e_p$, de donde se puede obtener la e_s .

La Figura 7A muestra el arreglo experimental para la obtención de la e del NF de C4/Au. Un haz de láser (con $\lambda=632$ nm) fue modulado electrónicamente por un amplificador Lock-In (SR-830 de la marca Stanford Research Systems) y después se hizo incidir en la muestra que se colocó sobre la superficie metálica de un sensor piroeléctrico (PVDF, por las siglas en inglés, Poly Vinylidene Fluoride) (el espesor del sensor fue de $150 \mu\text{m}$ con diámetro de 1 cm). En la superficie inferior del sensor piroeléctrico se conectó un electrodo con pasta epóxica conductora. La señal generada en el sensor PVDF fue preamplificada y después enviada al Lock-In, el cual amplifica y separa las señales de amplitud y fase para posteriormente enviar los datos de estas dos señales características para su almacenamiento y posterior procesamiento. La Figura 7B muestra una imagen del sensor PVDF y de la celda de IPPES.

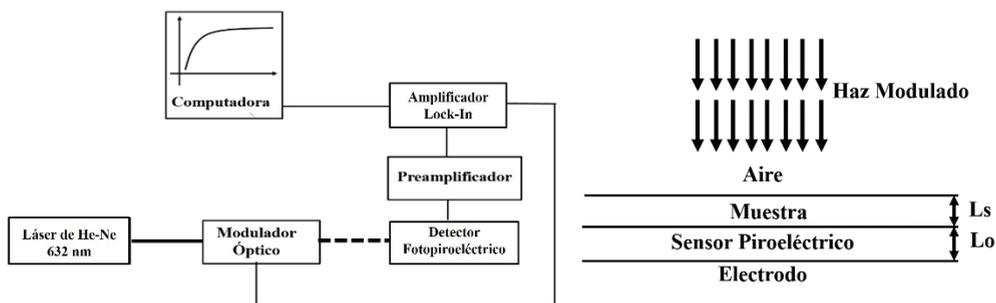


Figura 7. A) Arreglo experimental de IPPES. B) Detalle del detector fotopiroeléctrico.

Para obtener la e de los NFs, se utilizaron los parámetros que se muestran en la Tabla 1. Para calibrar el sistema de IPPES, se corrió el experimento sin muestra (aire) y agua, una vez que se obtienen los datos adecuados para el aire y el agua, se procedió a obtener la e de las muestras.

Tabla 1. Parámetros para el sistema de IPPES.

Parámetro	Valor
λ_e Longitud de onda del haz de excitación	632 nm
Frecuencia de modulación del haz de excitación	1-200 Hz
l_p Espesor del detector piroeléctrico	$150 \mu\text{m}$
e_p Efusividad térmica del sensor piroeléctrico	$530 \text{ W s}^{1/2}/\text{m}^2 \text{ K}$
e_g Efusividad térmica del aire	$5.51 \text{ W s}^{1/2}/\text{m}^2 \text{ K}$
E_{H2O} Efusividad térmica del agua	$1566 \text{ W s}^{1/2}/\text{m}^2 \text{ K}$

La Figura 8, muestra las señales características de la técnica IPPE, en este caso se muestra la señal de amplitud y de fase del biodiesel C4.

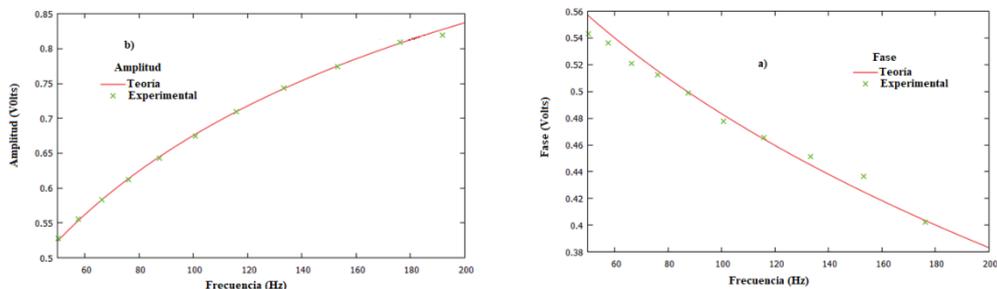


Figura 8. Señales características de IPPES del biodiesel C4: a) fase y b) amplitud.

2.5.3. Espectroscopia de Fotoacústica

En este proyecto se utilizó la técnica de PAS para obtener la ϵ de los siguientes NFs: biodiesel de soya con NPs de plata en diferentes concentraciones, biodiesel de oro con NPs de plata en diferentes concentraciones, biodiesel de jatrofa con NPs de oro en diferentes concentraciones y biodiesel de jatrofa con NPs de plata, en diferentes concentraciones.

El montaje experimental de la técnica PAS, se muestra en la Figura 9A, donde como se puede observar un láser de argón es modulado mediante un disco ranurado, el cual a su vez varía su velocidad de giro para así variar la frecuencia de modulación del haz del láser. Un amplificador Lock-In es el encargado de variar la frecuencia de modulación. Una vez que el haz es modulado, éste se hace incidir en la celda fotoacústica (ver detalle de esta en la Figura 9B, donde se coloca la muestra líquida sobre una hojuela de aluminio, la cual genera una onda acústica en función de la frecuencia de modulación, que es detectada mediante un micrófono, y posteriormente el amplificador Lock-In amplifica esta señal, separa la amplitud y la fase de la señal y envía los datos a una computadora, para que registre los datos tanto de amplitud como de fase de cada una de las muestras y así poder graficar y ajustar las señales obtenida .

El detalle de la sección transversal de la celda fotoacústica se muestra en la Figura 9B, en la cual se puede observar la hojuela de aluminio que hace la función de un transductor, ya que convierte la señal de transmitancia óptica proveniente de la muestra y la convierte a una señal mecánica o acústica, la cual es a su vez

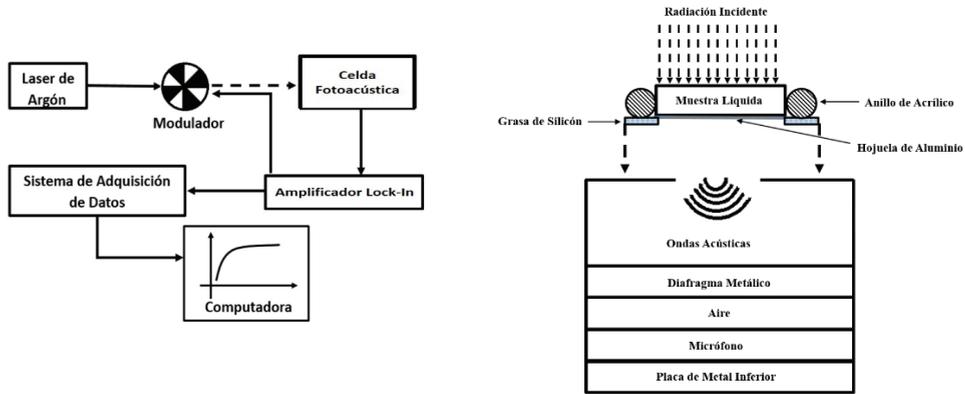


Figura 9. A) Montaje experimental de fotoacústica.
B) Sección transversal de la celda fotoacústica.

detectada por un micrófono que se conecta al amplificador Lock-in. En este caso para obtener la e de las diferentes muestras se utilizó la ecuación 4 (ecuación característica de PAS):

$$e_s = \frac{I_0 \rho_0 c_0}{I_R} \sqrt{\omega} \quad (4)$$

donde; ρ_0 es la densidad de la hojuela de aluminio utilizada, c_0 es el calor específico de la hojuela de aluminio utilizada, I_0 es el espesor de la hojuela de aluminio utilizado, ω es la frecuencia de modulación del láser incidente en la muestra ($2\pi f$ siendo f la frecuencia en Hz) y I_R es la pendiente de la señal de cada muestra.

Al correr el experimento como resultado se obtiene la pendiente de cada una de las muestras y se sustituye este valor en la Ecuación 4 para obtener la e de cada una de las muestras medidas.

3. Resultados y discusión

Para obtener la e de los NFs de biodiesel de soya (BS) con NPs de Ag, BS con NPs de Au, biodiesel C4 con NPs de Au, biodiesel de jatrofa (BJ) con NPs de Ag y BJ con NPs de Au, en diferentes concentraciones se calibró el sistema de PA (que se muestra en la Figura 9 con los parámetros que se muestran en la Tabla 2. Se calibró primero con aire (celda fotoacústica vacía) y posteriormente con agua destilada, y el valor obtenido se comparo con valores reportados en la literatura ($e_{H_2O} = 1601 \text{ WS}^{1/2} / \text{m}^2\text{C}$ en [23] y $e_{H_2O} = 1588 \text{ WS}^{1/2} / \text{m}^2\text{C}$ [24] para tener la certeza de que el sistema está calibrado correctamente. La Tabla 2, muestra los

parámetros de calibración que se utilizaron para obtener los valores de e de los NFs de soya/ag con PAS.

Tabla 2. Parámetros para la calibración del sistema de fotoacústica.

Parámetro	Valor
λ_e Longitud de onda del haz de excitación	632 nm
Frecuencia de modulación del table de excitación	1-300 Hz
ρ_θ Es la densidad de la hojuela de aluminio	2.7 gcm ⁻³
c_θ Es el calor específico de la hojuela de aluminio	0.9 Jg ⁻¹ °C ⁻¹
e_s Efusividad térmica del aire	5.51 Ws ^{1/2} /m ² K
e_{H_2O} Efusividad térmica del agua	1566 Ws ^{1/2} /m ² K
I_θ Es el espesor de la hojuela de aluminio utilizada	0.0016 cm

Las señales características de amplitud y fase para el NF de BS con NPs de Ag, se muestran en la Figura 10.

La Tabla 3, 4, 5, 6, 7 y 8 muestra las propiedades térmicas de los NFs de C4/Au, C4/Ag, BS/Au, BS/Ag, BJ/Au y BJ/Ag respectivamente:

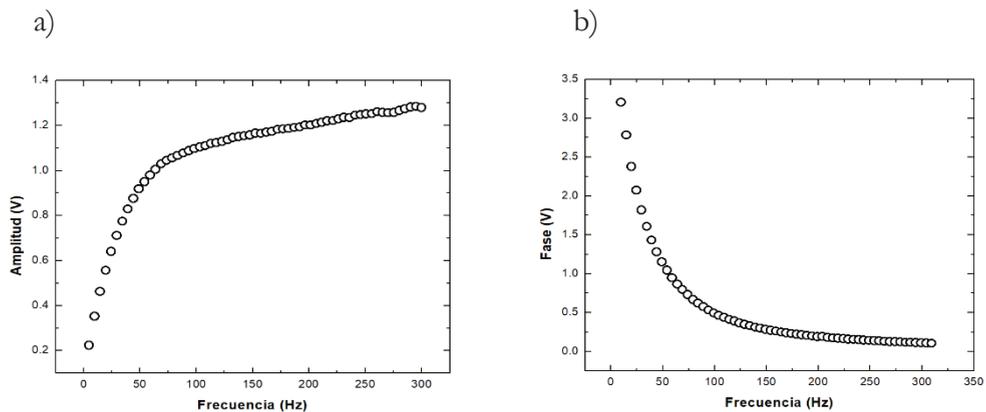


Figura 10. Señales características de PA del BS: a) amplitud y b) fase.

Tabla 3. Propiedades térmicas de los NFs de biodiesel C4 con NPs de Au.

Muestra No.	C4/Au (ml/mg)	% Volumen	D ($10^{-8} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$)	e ($\text{Ws}^{1/2}\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$)	k ($10^{-2} \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$)	Incremento en k (%)
Pura	5/0	0	17.0±0.4	554.21±3.6	22.81±1.5	0
1	5/1	0.001	17.5±0.3	557.41±3.6	23.55±1.5	3.24
2	5/3	0.003	17.9±0.3	566.40±3.7	23.66±1.6	3.72
3	5/5	0.005	18.7±0.3	578.00±3.8	24.99±1.7	9.55
4	5/7	0.007	19.6±0.3	586.47±3.8	25.96±1.7	13.80
5	5/8	0.008	21.1±0.3	592.75±3.9	27.41±1.8	20.16
6	5/10	0.010	22.6±0.4	600.42±3.9	28.54±1.9	25.12

Tabla 4. Propiedades térmicas de los NFs de biodiesel C4 con NPs de Ag.

Muestra No.	C4/Ag (ml/mg)	% Volumen	D ($10^{-8} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$)	e ($\text{Ws}^{1/2}\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$)	k ($10^{-2} \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$)	Incremento en k (%)
Pura	1/0	0	17.0±0.4	560.03±3.6	23.11±1.5	0
1	1/0.01121	0.0001	18.7±0.3	635.01±3.7	27.33±1.6	15.46
2	1/0.02242	0.0002	19.1±0.3	755.02±3.8	32.99±1.7	29.96
3	1/0.04484	0.0005	20.2±0.3	784.03±3.9	35.37±1.7	34.66
4	1/0.05605	0.0007	21.8±0.3	821.10±3.9	38.32±1.8	39.69
5	1/0.07847	0.0009	24.2±0.3	805.01±4.0	39.37±1.9	41.30
6	1/0.1121	0.0013	24.8±0.4	978.03±34.0	52.04±2.0	55.59

Tabla 5. Propiedades térmicas de los NFs de biodiesel de soya con NPs de Au.

Muestra No.	Soya/Au (ml/mg)	% Volumen	D ($10^{-8} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$)	e ($\text{Ws}^{1/2}\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$)	k ($10^{-2} \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$)	Incremento en k (%)
Pura	1/0	0	16.93±0.3	577.00±3.7	23.74±1.5	0
1	1/0.01424	0.0001	17.85±0.2	577.96±3.7	24.41±1.6	5.48
2	1/0.02848	0.0002	18.85±0.3	591.10±3.8	25.66±1.7	10.06
3	1/0.05696	0.0005	20.91±0.3	595.23±3.9	27.20±1.8	15.17
4	1/0.07119	0.0007	23.05±0.3	618.19±4.0	29.67±1.9	22.21
5	1/0.09967	0.0009	25.21±0.3	647.72±4.2	32.48±2.1	28.95
6	1/0.14239	0.0013	27.39±0.4	659.59±4.3	34.48±2.2	33.08

Tabla 6. Propiedades térmicas de los NFs de biodiesel de soya con NPs de Ag.

Muestra No.	Soya/Ag (ml/mg)	% Volumen	D ($10^{-8} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$)	e ($\text{Ws}^{1/2} \text{ m}^2\text{K}^{-1}$)	k ($10^{-2} \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$)	Incremento en k (%)
Pura	1/0	0	16.93 ± 0.38	577.96 ± 3.7	23.78 ± 1.5	0
1	1/0.01424	0.0001	21.59 ± 0.28	632.36 ± 4.1	28.96 ± 1.9	17.88
2	1/0.02848	0.0002	22.88 ± 0.21	756.04 ± 4.9	36.16 ± 2.3	34.23
3	1/0.05696	0.0005	24.72 ± 0.34	787.39 ± 5.1	39.14 ± 2.5	39.24
4	1/0.07119	0.0007	24.99 ± 0.26	820.82 ± 5.3	41.03 ± 2.7	42.04
5	1/0.09967	0.0009	26.39 ± 0.22	800.89 ± 5.2	41.14 ± 2.7	42.19
6	1/0.1424	0.0013	29.20 ± 0.22	976.03 ± 6.4	52.74 ± 3.4	54.91

Tabla 7. Propiedades térmicas de los NFs de biodiesel de jatrofa con NPs de Au.

Muestra No.	Jatrofa/Au (ml/mg)	% Volumen	D ($10^{-8} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$)	e ($\text{Ws}^{1/2} \text{ m}^2\text{K}^{-1}$)	k ($10^{-2} \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$)	Incremento en k (%)
Pura	2/0	0	15.82 ± 0.30	577.96 ± 3.7	23.74 ± 1.5	0
1	2/0.02848	0.0001	16.91 ± 0.31	836.29 ± 5.4	34.39 ± 2.2	30.96
2	2/0.05696	0.0002	17.43 ± 0.21	892.25 ± 5.8	37.25 ± 2.4	36.26
3	2/0.011392	0.0005	19.41 ± 0.42	935.16 ± 6.1	41.20 ± 5.0	42.37
4	2/0.1424	0.0007	21.91 ± 0.45	978.08 ± 6.4	45.78 ± 5.1	48.14
5	2/0.19934	0.0009	25.17 ± 0.43	982.76 ± 6.4	49.30 ± 5.1	51.85
6	2/0.2848	0.0013	27.17 ± 0.42	989.74 ± 6.4	51.59 ± 5.1	53.98

Tabla 8. Propiedades térmicas de los NFs de biodiesel de jatrofa con NPs de Ag.

Muestra No.	Jatrofa/Ag (ml/mg)	% Volumen	D ($10^{-8} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$)	e ($\text{Ws}^{1/2} \text{ m}^2\text{K}^{-1}$)	k ($10^{-2} \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$)	Incremento en k (%)
Pura	1/0	0	15.82 ± 0.34	577.96 ± 3.7	23.74 ± 1.5	0
1	1/0.01424	0.0001	16.67 ± 0.18	794.81 ± 5.2	32.45 ± 2.2	26.84
2	1/0.02848	0.0002	20.67 ± 0.27	812.41 ± 5.3	36.93 ± 2.4	35.72
3	1/0.05696	0.0005	23.97 ± 0.43	849.81 ± 5.5	41.60 ± 4.4	42.94
4	1/0.07119	0.0007	27.02 ± 0.42	867.61 ± 5.6	45.09 ± 4.4	47.35
5	1/0.09967	0.0009	30.03 ± 0.41	884.81 ± 5.8	48.48 ± 4.5	51.03
6	1/0.14239	0.0013	34.47 ± 0.44	919.21 ± 6.1	53.96 ± 4.7	56.01

4. Modelos Para Predecir la Conductividad Térmica en Nanofluidos

Desde hace aproximadamente dos décadas los investigadores han hecho el esfuerzo para predecir el mejoramiento de la conductividad térmica de NFs

basados en experimentos y análisis teóricos y se han propuesto modelos. Algunos de estos modelos analíticos que han permitido a los investigadores calcular la k de los NF, son: Maxwell [25], Hamilton-Crosser [26], Bruggemen, Jeffrey, Davis and H. E. Pattel [27]; estos modelos se basan en la teoría clásica de compuestos y mezclas conteniendo partículas del orden de milímetros o micrómetros fallan dramáticamente en predecir la k de NFs, debido principalmente a que estos modelos toman en consideración solamente el efecto de la concentración de las NPs dentro del fluido, sin tomar en cuenta otros efectos como el del incremento del área superficial de las NPs, el movimiento Browniano de las NPs, aumento o reducción de la viscosidad del HTF después de la adición de NPs o algún estabilizante, la estabilidad contra el tiempo de almacenamiento de los NFs, la morfología de las NPs, formación de cúmulos de NPs, aumento del área superficial por parte de las NPs dentro del fluido .

La Ecuación 5 muestra la ecuación para calcular la k de un NF con el modelo de Maxwell:

$$\frac{k_{eff}}{k_L} = \frac{k_s + 2k_L + 2(k_s - k_L) \Phi_s}{k_s + 2k_L - (k_s - k_L) \Phi_s} \quad (5)$$

donde: k_{eff} es la k del NF en cuestión, k_s es la k de las NPs, k_L es la k del fluido base y Φ_s es el % de volumen de las NPs en el fluido base .

La Ecuación 6 muestra el modelo de Hamilton-Crosser para calcular la k de los NFs:

$$\frac{k_{eff}}{k_L} = \frac{k_s + (n - 1) k_L - (n - 1) \Phi_s (k_L - k_s)}{k_s + (n - 1) k_L + \Phi_s (k_L - k_s)} \quad (6)$$

donde; k_{eff} es la k del NF en cuestión, k_s es la k de las NPs, n es el factor de esfericidad ($n = \Psi / 3$), para NPs esféricas $\Psi = 1$. k_L es la k del fluido base y Φ_s es el % de volumen de las NPs en el fluido base .

Como se puede observar, en los dos modelos anteriores solamente se toma en cuenta la k del fluido base , de las NPs y el porcentaje de volumen de las NPs.

$$k_{eff} / k_L$$

4.1. Predicción de la k en NFs con los Modelos de H-C y Maxwell

La Tabla 9 muestra los valores de la k de los diferentes NFs de C4-Au; como se puede apreciar en esta Tabla, los valores fueron divididos entre el valor de la k del fluido bas .

Tabla 9. La k de los NFs de C4-Au, experimenta con el modelo H-C y Maxwell.

Muestra No.	%V ($\times 10^{-3}$)	Experimental	H-C	Maxwell
0	0	1		
1	1	1.032	1.031	1.031
2	3	1.037	1.041	1.037
3	5	1.095	1.047	1.043
4	7	1.130	1.053	1.049
5	8	1.210	1.056	1.052
6	10	1.250	1.063	1.058

En la Figura 11, se muestran los datos experimentales los valores predcidos de k_{eff} / k_L de los NFs de C4-Au con el modelo teórico de Hamilton-Crosser (HC), el modelo teórico de Maxwell contra el %V.

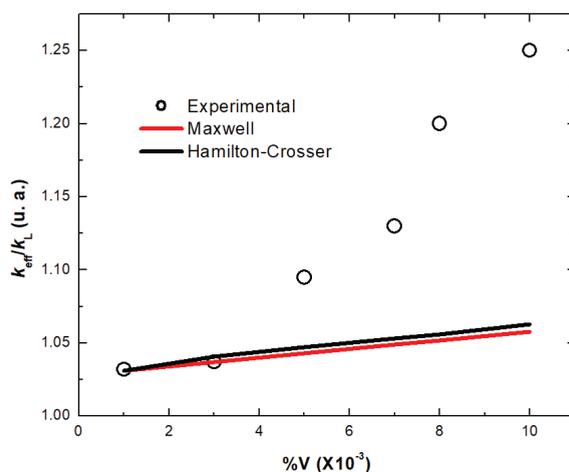


Figura 11. Valores de k_{eff}/k_L para los NFs de C4-Au, experimentales, con los modelos de H-C y M.

Como se puede apreciar, tanto el modelo de H-C como el modelo de Maxwell solo se ajustan para los primeros dos NFs; esto se debe a que estos modelos, como se mencionó anteriormente, solamente toman en cuenta el %V, la k del fluido base y la k del material en bulto de las NPs.

4.2. Predicción de la k en NFs con Redes Neuronales Artificiales

Como se mencionó anteriormente, la predicción de la k para los NFs aquí estudiados mediante la utilización de modelos teóricos clásicos, como el modelo de Maxwell y H-C, no produjo una buena aproximación, ni siquiera una aproximación aceptable, por lo que para predecir la k de los NFs se utilizaron las llamadas redes neuronales artificiales (o ANNs, por las siglas en Inglés de Artificial Neural Networks). En la literatura existen muchos trabajos de investigación que predicen la k de NFs, utilizando ANNs; como ejemplo: Hosjjat y colegas [9] prepararon tres tipos diferentes de NFs, dispersando NPs de Al_2O_3 , TiO_2 y CuO en una solución de carboximetilcelulosa y midieron la k del fluido base y de los NFs con varias concentraciones de NPs; los resultados que obtuvieron de sus investigaciones demostraron que la k de los NFs es más alta que la del fluido base, y el incremento en la k de los NFs varía exponencialmente en función de la concentración de NPs utilizada. Propusieron un modelo basado en redes neuronales para representar la k como una función de la temperatura, la concentración de NPs y la k de las NPs. Los resultados obtenidos con las ANNs estuvieron acorde a los datos experimentales; por otro lado, también utilizaron el modelo teórico clásico denominado H-C el cual solo fue satisfactorio para NFs con baja concentración de NPs.

A continuación, se da un panorama general de los que es una ANN, las partes y características que la componen: una ANN es un sistema de procesamiento de información que tiene características de desempeño similares a una red neuronal biológica. Las ANNs han sido desarrolladas para generar modelos matemáticos, basadas en las siguientes suposiciones: 1) el procesamiento de información ocurre entre muchos elementos simples llamados neuronas, 2) las señales pasan ente las neuronas las cuales están interconectadas mediante enlaces (links), 3) cada enlace tiene un peso asociado, el cual, en una red neural típica, multiplica la señal transmitida, 4) cada neurona aplica una función de activación (usualmente no-lineal) a la entrada de la ANN, para determinar la señal de salida.

Una ANN se caracteriza por: a) el patrón de conexión entre las neuronas (su arquitectura), b) el método para determinar el valor de los pesos en las conexiones (llamado también algoritmo de entrenamiento o aprendizaje), c) la función de activación de la ANN.

Existen muchas arquitecturas de ANNs, las cuales se pueden consultar en [28]; sin embargo, en este proyecto se utilizó una arquitectura llamada red multicapa con propagación hacia atrás (o BPMLN, por las siglas en inglés de Back Propagation Multi Layer Network). El funcionamiento de una ANN de este tipo funciona de la siguiente manera: antes de comenzar el proceso de entrenamiento se debe determinar un estado inicial, es decir, se asigna un conjunto inicial de pesos para las diversas conexiones entre neuronas de la ANN; normalmente esta asignación de valores a los pesos se hace de manera aleatoria. Una vez hecho esto, se aplica un patrón de entrada como estímulo para la primera capa de las neuronas de la ANN; este estímulo que consta de la interconexión de todos los nodos de la ANN se va propagando primero hacia las capas ocultas y después a la capa de salida; una vez ahí se compara el resultado de la capa de salida con la salida que se desea obtener, y se calcula el error cuadrático medio para cada variable de salida. Después los errores calculados se transmiten hacia atrás, partiendo de la capa de salida hacia todas las neuronas de las capas ocultas o intermedias; este proceso se repite, capa por capa, hasta que todas las neuronas de la red hayan recibido el error cuadrático medio que describa su aportación relativa al error total. Basándose en el error obtenido, la ANN reasigna nuevos valores a los pesos de las conexiones de cada neurona, de manera que en la siguiente vez que se presente el mismo patrón, el error cuadrático medio sea cada vez menor y la salida esté más cercana a la deseada [29].

En este proyecto se implementó una ANN de tres capas, una de entrada, una capa oculta y una capa de salida, como entradas se implementaron: la k de las NPs y del fluido base, la temperatura de los NFs, el %V, el diámetro de las NPs y la función de activación b.

En la Figura 12, la \bar{T} y $\overline{\%V}$, son la temperatura normalizada y el porcentaje de volumen normalizados respectivamente, los cuales se obtuvieron mediante las Ecuaciones 7 y 8.

$$\bar{T} = \frac{T - T_{min}}{T_{max} - T_{min}} \quad (7)$$

$$\overline{\%V} = \frac{\%V - \%V_{min}}{\%V_{max} - \%V_{min}} \quad (8)$$

donde; T , T_{min} y T_{max} son la temperatura del NF, la temperatura mínima que existió a la hora de obtener la k de los NFs de manera experimental y la temperatura máxima que existió a la hora de obtener la k de los NFs de manera experimental, respectivamente y $\%V$, $\%V_{min}$ y $\%V_{max}$ son el $\%V$ del NF, el $\%V$ del NF con menor concentración y el $\%V$ del NF la mayor concentración de NPs.

La Figura 12, muestra el diagrama de flujo de la ANN creada, y el funcionamiento es como sigue: primero se crea la ANN deseada con la herramienta NNTOOLKIT (de las siglas en Inglés de Neural Network Tool Kit) del software Matlab ®; esta herramienta nos permite crear la ANN de acuerdo a nuestras necesidades (el número de entradas, capas ocultas y salidas que deseemos). Después de haber creado la ANN, es necesario ingresar los datos experimentales tanto de entrada como de salida mediante tablas, y una vez hecho esto, la red ANN asigna valores iniciales (de manera aleatoria) a las conexiones o pesos de la ANN; después de esto, la ANN realiza sus tres fases: entrenamiento, validación y prueba. En cada iteración del programa de la ANN, está calcula el error cuadrático medio o ECM, reajustando los valores de los pesos hasta que

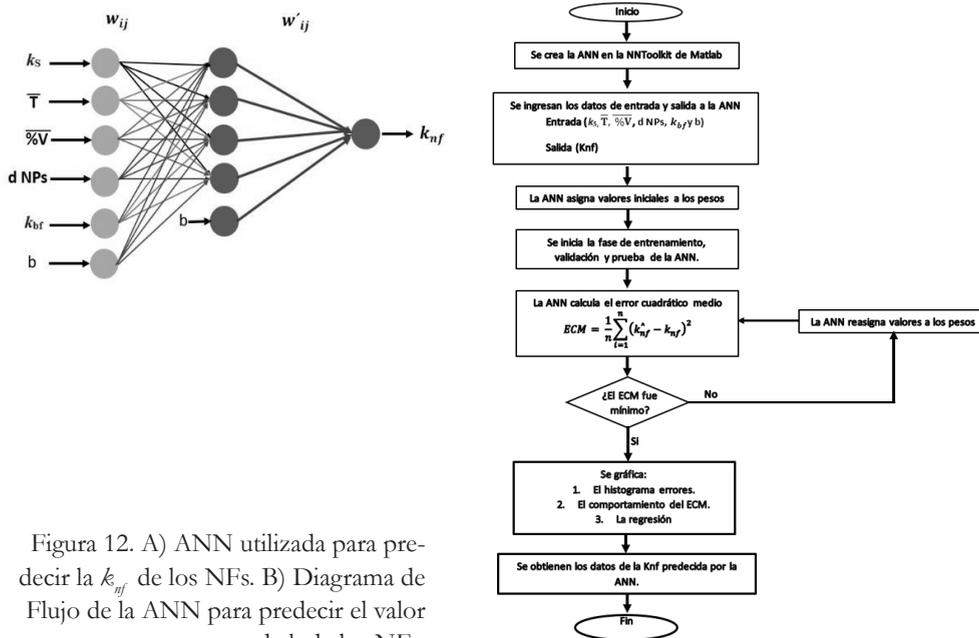


Figura 12. A) ANN utilizada para predecir la k_{nf} de los NFs. B) Diagrama de Flujo de la ANN para predecir el valor de k de los NFs.

este error sea el mínimo, y una vez que el error es mínimo, el programa de la ANN muestra en forma de gráfica el histograma del error cuadrático medio, el comportamiento del ECM y la regresión que realizó la ANN para minimizar al ECM; por último, el programa de la ANN despliega una ventana con los valores precedidos de la k del NF en cuestión.

4.3. Predicción de la k de los NFs C4-Au con ANNs

La ANN que muestra la Figura 12A y 12B, se utilizó para predecir la k de manera teórica de los NFs, y así poder comparar estos valores con los experimentales; al ingresar los datos de entrada de los NFs de C4-Au, se obtuvieron los valores que se muestran en la Tabla 9.

La Figura 13A muestra los valores experimentales obtenidos mediante la ANN y con el modelo teórico de H-C de la k vs. %V. En las Figuras 13B y 13C, se observa una diferencia al tratar de predecir los valores de k de los NFs soya-Au y jatropa-Au, respectivamente, al usar los modelos ANN y H-C. de aquí que sea una ventaja utilizar el modelo de ANNs.

Tabla 9. Valores de k de los NFs de C4-Au de manera experimental y con la ANN.

Muestra (mg/ml)	% Vol	$k(X10^{-4})(W/mK)$ Experimental	$k(W/mK)$ ANN
1/5	0.001	23.55	23.52
3/5	0.003	23.66	23.83
5/5	0.005	24.99	24.82
7/5	0.007	25.96	26.28
8/5	0.008	27.41	27.12
10/5	0.01	28.54	28.70

4.4. Sistema Cerrado para Verificar el Funcionamiento de los NFs

En este proyecto se construyó un prototipo de un sistema cerrado, el cual cuenta con un serpentín donde se hacen circular los HTF, como el agua o anti-refrigente/congelante de motor. La Figura 14 muestra el diagrama de las partes que componen a este prototipo, las cuales son: un contenedor para enfriar/calentar los fluidos anteriores, un contenedor, una bomba para hacer recircular, un sensor para medir la temperatura del líquido a enfriar o calentar el HTF, respectivamente. De igual forma, cuenta con un microcontrolador (tarjeta

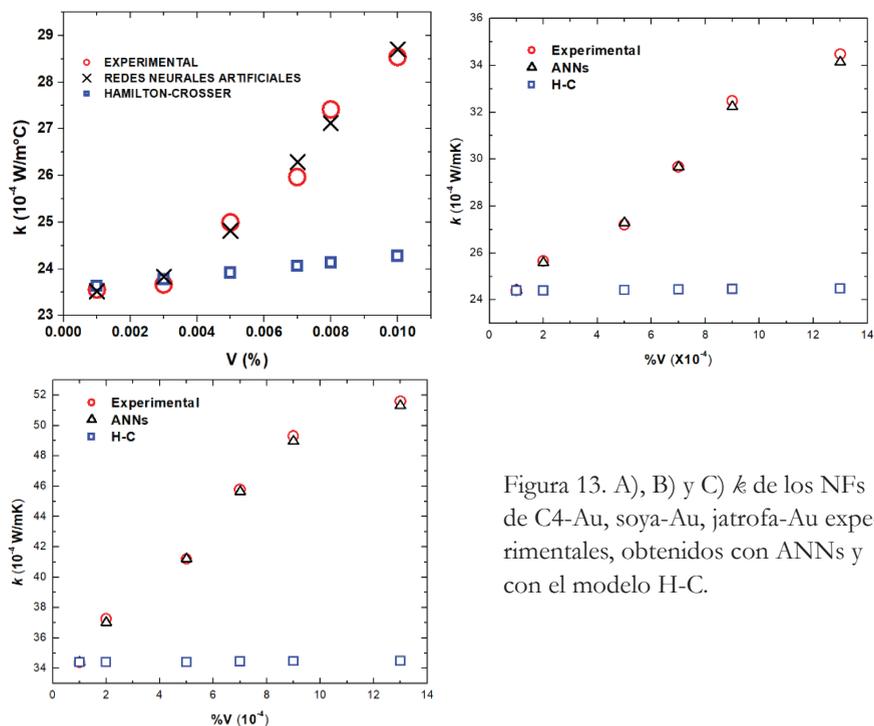


Figura 13. A), B) y C) k de los NFs de C4-Au, soya-Au, jatrofa-Au experimentales, obtenidos con ANNs y con el modelo H-C.

Arduino) como sistema de adquisición de datos, una computadora para registrar y visualizar los datos del sensor de temperatura y un serpentín por donde circula el líquido.

Respecto a los transportadores de calor utilizados (agua y antirefrigerante) se puede resaltar lo siguiente: el agua es un HTF económico para temperaturas hasta 100 °C. Para temperaturas superiores se debe presurizar el circuito para poder continuar estando el fluido en fase líquida – agua sobrecalentada – y por tanto los costes aumentan considerablemente. Es por ello que su campo se delimita mucho a temperaturas inferiores a esos 100 °C, y a aplicaciones como la calefacción doméstica y del sector servicios.

El etilenglicol, se usa comúnmente como un agente anticongelante/refrigerante en el sistema de refrigeración del automóvil; también se utiliza en soluciones para deshelar aviones y barcos. En forma pura es un líquido incoloro con un sabor dulce y una textura ligeramente almibarada.

El funcionamiento del sistema cerrado es como sigue: primero se energiza la resistencia eléctrica y esto provoca que se caliente el agua en el contenedor principal; por otro lado, el sensor se programó para que tome la temperatura del agua

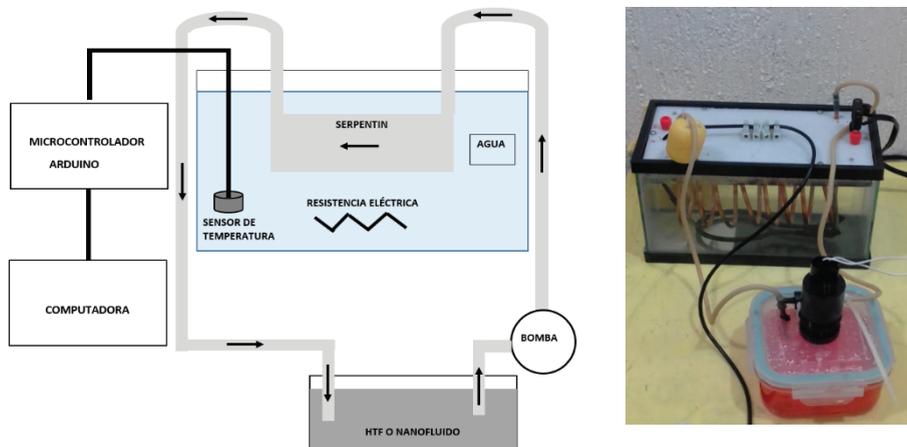


Figura 14. Sistema cerrado para enfriar/calentar un líquido e imagen del sistema cerrado.

cada cinco segundos. Una vez que el agua adquiere una temperatura de 60 °C, se des-energiza la resistencia eléctrica y se evalúa el tiempo que tarda el agua en llegar a la temperatura ambiente a 25 °C. Para evaluar el tiempo que tarda el agua en llegar a temperatura ambiente, se llevaron a cabo 3 pruebas: (1) dejar que el agua se enfriara hasta temperatura ambiente por sí sola (sin activar el sistema de recirculación de HTF-serpentín y bomba), (2) se hizo circular agua como HTF por el serpentín, y (3) se hizo circular refrigerante (antirefrigerante/congelante) como HTF por el serpentín. La Figura 15 muestra la curva de calentamiento del agua y las curvas de enfriamiento del agua de las tres pruebas mencionadas anteriormente.

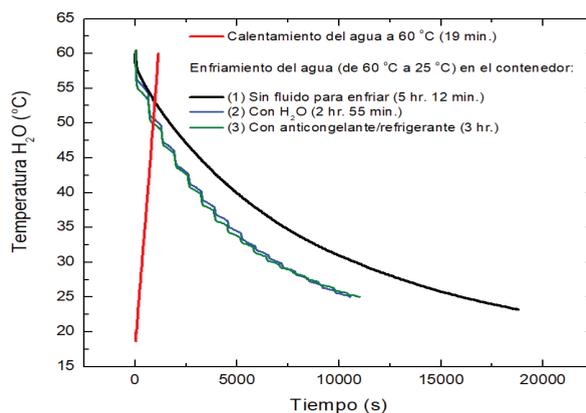


Figura 15. Calentamiento y enfriamiento del H₂O en el sistema cerrado.

La Figura anterior muestra con la línea en color rojo el calentamiento del agua que fue de 60 °C del agua de 19 minutos, la línea en color negro representa el

enfriamiento del agua sin accionar el sistema de recirculación (bomba, tubería y serpentín); es decir, se dejó que el agua llegará a temperatura ambiente por sí sola, lo cual tomó un tiempo de 5 horas con 12 minutos a 25 °C; la línea en color azul representa el enfriamiento del agua haciendo circular por el sistema de intercambio de calor (bomba, tubería y serpentín) agua como HTF, lo cual tomó dos 2 h con 55 min minutos a 25 °C; la curva en color verde representa al enfriamiento del agua haciendo circular por el sistema de intercambio de calor refrigerante de automóvil (antirefrigerante /congelante), lo que permitió que el agua tardará tres horas en llegar a temperatura ambiente. Como se observa, el agua tiene mejor tiempo de enfriamiento puesto que tiene mayor conductividad térmica que el anticongelante. Una de las limitaciones es que para hacer estas pruebas con nanolíquidos necesitaríamos una gran concentración de nanopartículas para obtener un volumen grande de nanolíquidos, De aquí que se hicieron pruebas con líquidos bases de conductividad alta como el agua y un antirefrigerante/congelante, simulando un circuito cerrado de un radiador de un carro.

5. Conclusiones

En este proyecto de investigación se obtuvieron las propiedades térmicas de seis tipos de NFs, utilizando las Técnicas Fototérmicas, estudiándose el incremento de la conductividad térmica de los NFs con respecto al fluido base (biodiesel). El incremento de la k de los NFs para los NFs de C4/Au fue de 3.24 % a 25.12 % para la muestra con menor y mayor concentración, respectivamente. Para los NFs de biodiesel de soya con NPs de Ag se obtuvo un incremento que va de 17.88 % a 54.91 %, para la muestra con menor y mayor concentración de NPs, respectivamente, mientras que para los NFs de biodiesel de soya con NPs de Au el incremento fue de 5.4 % y de 33.08 % para la muestra con menor y mayor porcentaje de volumen, respectivamente. Respecto a los NFs de biodiesel de jatrofa con NPs de Au, el incremento en la k para la muestra con menor concentración de NPs fue de 30.96 % y de 53.98 %, para la muestra con mayor concentración de NPs; en el caso de los NFs de jatrofa con NPs de Ag la k , presentó un incremento de 26.84 % y de 56.01 % para la muestra con menor y mayor concentración de NPs, respectivamente. Se puede concluir que los NFs de biodiesel de jatrofa con NPs de Ag son los que presentaron el mayor incremento en su k , lo cual representa un futuro prometedor para este tipo de NFs; el hecho de que aceite de jatrofa no es comestible representa una ventaja si se desea comercializar con estos NFs, ya que no se tendría la polémica de si utilizar un aceite para crear un biodiesel o utilizarlo como aceite comestible.

Por otra parte, el incremento de la conductividad térmica de los NFs estudiados tiene un comportamiento no lineal en función de la concentración, siendo anómalo. Mediante un modelo teórico basado en redes neuronales artificiales, se redijo el valor de k de los NFs estudiados y como se obtuvo un factor de correlación de 0.9966, pendiente, 0.9960, 0.99965, 0.99985 y 0.99961 para los NFs de C4-Au, C4-Ag, BS-Ag, BS-Au, BJ-Au y BJ-Ag, respectivamente. Por otro lado, los modelos clásicos como el de Maxwell o Hamilton-Crosser no predijeron el comportamiento de forma adecuada. De igual forma, se presentó la construcción de un intercambiador de calor (como un radiador de motor), donde obtuvimos un tiempo de calentamiento a 60 °C del agua en 19 minutos. Los tiempos de enfriamiento fueron de 5 horas con 12 minutos, 2 horas con 55 minutos y 3 horas, sin utilizar ningún HFT, agua y anticongelante, respectivamente, concluyendo que el agua es el mejor conductor de calor. Pruebas preliminares serán hechas con nanolíquidos, ya que posibilitan un aumento de esta conductividad, por lo que se tiene limitaciones por la cantidad de muestra usada.

Agradecimientos

Los autores quisieran agradecer al CONACYT, COFAA, y a CGPI-IPN, Mexico, por su apoyo. De igual forma a la Red de Nanofotónica y a la Red de Nanociencias y Micro-Nanotecnología.

Bibliografía

1. Li, Y., Zhou, J., Tung, S., Schneider, E., & Xi, S. (2009). A review on development of nanofluid preparation and characterization. *Powder Technol.*, 196, 89-101.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2009.07.025>
2. Fang, X., Ding, Q., Fan, L., Yu, Z., Xu, X., Cheng, G., Hu, Y., & Cen, K. (2013). Enhanced thermal conductivity of ethylene glycol-based suspensions in the presence of silver nanoparticles of various sizes and shapes. *Proceedings of the ASME 2013 Heat Transfer Summer Conference HT2013*. July 14-19, 2013, Minneapolis, MN, USA.
<https://doi.org/10.1115/HT2013-17175>
3. Wu, S., Zhu, D., Li, X., Li, H., & Lei, J. (2009). Thermal energy storage behavior of Al_2O_3 - H_2O nanofluid. *Termochim. Acta*, 483, 73-77.
<https://doi.org/10.1016/j.tca.2008.11.006>
4. Choi, C., Yoo, H. S., & Oh, J. M. (2008). Preparation and heat transfer properties of nanoparticle-in-transformer oil dispersions as advanced energy efficient coolants. *Curr. App. Phys.* 8, 710-712.
<https://doi.org/10.1016/j.cap.2007.04.060>
5. Kulkarni, D. P., Vajjha, R.S., Das, D. K., & Oliva, D. (2008). Application of aluminum oxide nanofluids in diesel electric generator as jacket water coolant. *Appl. Thermal Eng.*, 28, 1774-1781.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2007.11.017>
6. Yu, W., France, D. M., Choi, S. U. S., & Routbort, J. L. (2007). Review and assessment of nanofluid technology for transportation and other applications. *Energy Systems Division, Argonne National Laboratory*.
<https://doi.org/10.2172/919327>
7. Wang, X. Q., & Mujumdar, A. S. (2008) Review on nanofluid. Part II: experiments and applications. *Braz. J. Chem. Eng.*, 25, 631-648.
<https://doi.org/10.1590/S0104-66322008000400002>
8. Wang, R. X., & Xie, H. B. (2003). A refrigerating system using HFC134a and mineral lubricant appended with n-TiO₂(R) as working fluid. *Proceedings of the 4th international symposium on HAVC*. Beijing, China: Tsinghua University Press, 888-892.
9. Hojjat, M., Etemad, S., G., Bagheri, R., & Thibault, J. (2011). Thermal conductivity of non-Newtonian nanofluids: Experimental data and modeling using neural network. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 54, 1017-1023.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.11.039>

10. Choi, S. U. S., & Eastman, J. A. (1995). Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. *Proceedings of the 1995 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition San Francisco, CA, USA*.
11. Martínez, G., Sánchez, N., Encinar, J. M., & González, J. F. (2014). Fuel properties of biodiesel from vegetable oils and oil mixtures. Influence of methyl esters distribution. *Biomass and Bioenerg.*, 63, 22-32.
<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.01.034>
12. Wen, D., Lin, G., Vafaei, S., & Zhang, K. (2009). Review of nanofluids for heat transfer applications. *Particuology*, 7, 141-150.
<https://doi.org/10.1016/j.partic.2009.01.007>
13. Encinar, J. M., González, J. F., Rodríguez, J. J., & Tejedor, A. (2002). Biodiesel fuels from vegetable oils: transesterification of *Cynara cardunculus* L. oils with ethanol. *Energ. Fuels*, 16, 443-450.
<https://doi.org/10.1021/ef010174h>
14. Rojo, F. (2018). *Tablas de Espectroscopía Infrarroja*.
http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/TablasIR_24985.pdf
15. Gutierrez Fuentes, R., Pescador Rojas, J. A., Jiménez-Pérez, J. L., Sánchez Ramírez, J. F., Cruz-Orea, & Mendoza-Alvarez, J. G. (2008). Study of thermal diffusivity of nanofluids with bimetallic nanoparticles with Au(core)/Ag(shell) structure. *Appl. Surf. Sci.*, 255, 781-783.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2008.07.023>
16. Gannon, C., Patra, C., Bhattacharya, R., Mukherjee, P., & Curley, S. (2008). Intracellular gold nanoparticles enhance non-invasive radiofrequency thermal destruction of human gastrointestinal cancer cells. *J. Nanobiotechnol.*, 6, 1-9.
<https://doi.org/10.1186/1477-3155-6-2>
17. Balderas-López, J. A., Acosta-Avalos, D., Alvarado, J. J., Zelaya-Angel, O., Sánchez-Sinencio, F. et al. (1995). Photoacoustic measurements of transparent liquid samples: thermal effusivity. *Meas. Sci. Technol.*, 6, 1163-1168.
<https://doi.org/10.1088/0957-0233/6/8/011>
18. Shen, J., Lowe, R., & Snook, R. (1992). A model for cw laser induced mode-mismatched dual-beam thermal lens spectrometry. *Chem. Phys.*, 165(2-3), 385-396.
[https://doi.org/10.1016/0301-0104\(92\)87053-C](https://doi.org/10.1016/0301-0104(92)87053-C)
19. Gordon, J. P., Leite, R. C. C., Moore, R. S., Porto, S. P. S., & Whinnery, J. R. (1965). Long-transient effects in lasers with inserted liquid samples. *J. Appl. Phys.*, 36(3), 3-8.
<https://doi.org/10.1063/1.1713919>
20. Carter, C. A., & Harris, J. M. (1984). Comparison of models describing the thermal lens. *Appl. Opt.*, 23, 476-481.
<https://doi.org/10.1364/AO.23.000476>

21. Balderas-López, J. A., & Mandelis, A. (2003). New photopyroelectric technique for precise measurements of the thermal effusivity of transparent liquids. *Int. J. Thermophys.*, 24, 463-471.
<https://doi.org/10.1023/A:1022972021880>
22. Flores-Cuautle, J. A., Cruz-Orea, A., & Suaste-Gómez, E. (2009). Thermal effusivity of the $\text{Pb}_{0.88}\text{Ln}_{0.08}\text{Ti}_{0.98}\text{Mn}_{0.02}\text{O}_3$ (Ln=La, Eu) ferroelectric ceramic system by inverse photopyroelectric technique. *Ferroelectrics*, 386(1), 36-40.
<https://doi.org/10.1080/00150190902961264>
23. Balderas-López, J. A., Gutiérrez-Juárez, G., Jaime-Fonseca, M. R., & Sánchez-Sinencio, F. (1999). Measurements of thermal effusivity of liquids using a conventional photoacoustic cell. *Rev. Sci. Instrum.*, 70(4), 2069-2071.
<https://doi.org/10.1063/1.1149713>
24. Lachaine, A., & Poulet, P. (1984). Photoacoustic measurement of thermal properties of a thin polyester film. *Appl. Phys. Lett.*, 45, 953-954.
<https://doi.org/10.1063/1.95454>
25. Maxwell J. C. (1873). *A treatise on electricity and magnetism*. Clarendon Press, Oxford, UK.
26. Hamilton, R. L., & Crosser., O. K. (1962). Thermal conductivity of hereogeneous two-component systems. *I & EC Fundamentals*, 1, 187-191.
<https://doi.org/10.1021/i160003a005>
27. Hrishikesh, E., Patel, T., Sundararajan, T., Pradeep, A., Dasgupta, N., Dasgupta, N. et al. (2005). A micro-convection model for thermal conductivity of nanofluid . *Pramana*, 65, 863-869.
<https://doi.org/10.1007/BF02704086>
28. Fausett, L. (1994). *Fundamentals of Neural Networks, Architectures, Algorithms and Applications*. Prentice Hall, USA
29. Valencia Reyes, M. A., Yáñez Márquez, C., Sánchez Hernández, L. P. (2007). *Algoritmo backpropagation para redes neuronales: conceptos y aplicaciones*.
<http://www.repositoriodigital.ipn.mx/handle/123456789/8628>