Measurement of the nonlinear optical properties of olive oil using Z-Scan

Medida de las propiedades ópticas no-lineales del aceite de oliva usando Z-Scan

A. García¹, S. Valbuena², R. Sarmiento¹, F. Racedo^{1*}

¹. Grupo de Espectroscopia Óptica Emisión y Láser - GEOEL, Univ. del Atlántico, Barranquilla (Colombia)

². Fac. Ciencias Básicas – Grupo EDO'S, Univ. del Atlántico, Barranquilla, (Colombia)

*Email: fran@mail.uniatlantico.edu.co

Received / Recibido: 26/09/2014 . Accepted / Aceptado: 12/03/2015

DOI: <http://dx.doi.org/10.7149/OPA.48.1.55>

ABSTRACT:

A study of non-linear optical properties of extra virgin olive oil diluted in ethylic alcohol at different levels of concentration was made: 75% and 50%. The Z-Scan technique by transmission was used for the characterization of samples in closed settings, and it was also used as the excitation source an Nd-YAG laser emitting in 532nm. For the control of the technique was implemented an interface in LabVIEW that allowed us to visualized and control the development of the Z-Scan technique in real time. From the transmittance curves obtained was possible to calculate for each sample the non-linear refractive index. The obtained results show a variation of the non-linear optical properties of extra virgin olive oil when it is diluted in alcohol.

Key words: Z-Scan, Index nonlinear Refractive, Transmittance, Olive Oil

RESUMEN:

Se realizó un estudio de las propiedades ópticas no-lineales del aceite de oliva en estado extra virgen y diluido en alcohol etílico a niveles de concentración de 75% y 50%. Para la caracterización de las muestras se utilizó la técnica Z-Scan por transmisión en configuración cerrada. Como fuente de excitación se usó un láser de Nd:YAG emitiendo en 532nm. Para el control de la técnica se implementó una interfaz en LabVIEW que permite monitorear en tiempo real el desarrollo de la medida. A partir de las curvas de transmitancia obtenidas se calculó el índice de refracción no-lineal para cada muestra. Los resultados muestran una variación de las propiedades ópticas no-lineales del aceite de oliva extra virgen cuando es diluido en alcohol etílico.

Palabras clave: Z-Scan, índice de refracción no-lineal, transmitancia, aceite de Oliva extra virgen

REFERENCES AND LINKS / REFERENCIAS Y ENLACES

- [1] R. Boyd, Nonlinear Optics. New York, 3 ed. Academic Press (2007).
- [2] M. M. Méndez, M. L. Arroyo, J. D. Barrnco, E. Martí, "Medición del Índice de refracción no-lineal positivos y negativos en muestras de colorantes en solución," II Encuentro, Participación de la mujer en la ciencia, León, Guanajato (2005).
- [3] S. L. Gómez, F. L. S. Cuppo, A. M. Figueiredo, "Nonlinear Optical Properties of Liquid Crystals," Braz J Phys **33**, 813-820 (2003).
<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-97332003000400035>
- [4] C. R. Mendonça. R. et al. "Demonstrating non linear optical effect using Z-SCAN technique in Chinese tea", Revista Brasileira de Ensino de Física, **21**, 272-279 (1999).
- [5] M. Sheik-Bahae, A. A. Said, T. Wei, D. J. Hagan, E. W. V. Stryland,, "Sensitive measurement of optical nonlinearities using a single beam," IEEE J Quantum Elect **26**, 760769 (1990).
<http://dx.doi.org/10.1109/3.53394>

- [6] R. Tambay, A. Ramalingam, "Third Order Non-Linear Optical Properties Of Toluidne Blue O Dye Doped Polymer Film," Center of Laser Technology, Anna University, Chennai-600025, (2004).
- [7] L. Rodríguez, J. Ramírez, A. Marcano, "Lente térmica inducida por diodo laser como experiencia didáctica de laboratorio de física," Rev Mex Fis **51**, 1-4 (2005)
- [8] M. Falconieri, "Thermo-Optical effects in Z-Scan measurements using high-repetition-rate laser," J Opt A: Pure Appl Opt **1**, 662-667 (1999).
<http://dx.doi.org/10.1088/1464-4258/1/6/302>

1. Introducción

Con la invención del láser en 1960 por Theodore H. Maiman se observaron nuevos fenómenos que hasta el momento no se habían podido notar debido a la falta de fuentes con altas densidades de energía electromagnética. Franken et al. en 1961 [1] fueron los primeros en notar la generación de segundo armónico (GSH) con lo cual se da el inicio a la óptica no-lineal la cual trata sobre el estudio de las propiedades ópticas de un cuerpo cuando este es sometido a un campo electromagnético de alta densidad de energía.

En la actualidad existen varias técnicas que permiten caracterizar las propiedades ópticas no-lineales de los materiales, entre ellas se pueden resaltar: La rotación elíptica, la medida de la distorsión del haz, interferencia de dos o cuatro ondas, Z-Scan [2, 3] entre otras. Con las técnicas mencionadas podemos obtener parámetros tales como el índice de refracción no-lineal y el coeficiente de absorción no-lineal, algunas de ellas con mayor complejidad experimental que otras.

Durante la década de los 80 se incrementó el estudio de las propiedades óptica no-lineales en materiales de origen orgánico debido a su alta no-linealidad. El aceite de oliva es un compuesto de origen orgánico elaborado a partir de la oliva o aceituna, la cual contiene ácido oleico, compuesto este que presenta alta no linealidad óptica [4, 5].

El uso de materiales orgánicos para la elaboración de dispositivos opto electrónicos está en aumento y esto se debe a la gran respuesta no-lineal que presentan estos materiales sin contar su fácil obtención. Por esta razón se implementó la técnica Z-Scan para caracterizar las propiedades ópticas no-lineales del aceite de oliva extra virgen bajo distintos niveles concentración en alcohol etílico.

2. Z-Scan

La técnica Z-Scan es un método usado con mucha frecuencia para determinar el índice de refracción no-lineal en ciertos materiales. Esta técnica fue desarrollada por Sheik-Bahae et al. [5] en 1989 y se basa en el principio de distorsión espacial que sufre un haz láser al momento de atravesar un material con propiedades ópticas no-lineales.

Una de las principales características de la técnica es que permite obtener la magnitud y el signo del índice de refracción no-lineal a través de una relación simple entre la variación de la transmitancia normalizada observada y la diferencia de fase inducida en el material, esto debido al tercer orden de la susceptibilidad $\chi^{(3)}$, sin necesidad de cálculos matemáticos complejos.

Fig. 1. Montaje experimental para la técnica Z-Scan, la muestra se desplaza a lo largo del eje focal de haz láser. Un fotodetector recoge la señal transmitida por la muestra y es enviada a una tarjeta de adquisición para su procesamiento.

En la técnica Z-Scan (Fig. 1) se mide la potencia transmitida a través de una abertura (iris) de radio r y si se focaliza un haz láser sobre un punto y este haz atraviesa un material ópticamente no-lineal, el cual es desplazado a lo largo del eje de propagación del haz (eje z), entonces este desplazamiento de la muestra alrededor del eje focal genera una variación en la intensidad sobre el material. Este cambio de intensidad induce en el material una respuesta no-lineal de tercer orden conocido como efecto Kerr óptico.

Para eliminar el efecto lineal presente en la muestra, la potencia transmitida es dividida por la potencia del láser en un punto muy distante del foco, esta cantidad se conoce como transmitancia normalizada y se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$T(z) = \frac{P(z)}{P(\infty)} \quad (1)$$

La muestra se desplaza a lo largo del eje focal experimentando una diferencia en la transmitancia en función de la posición, lo cual genera un desfase en la onda transmitida $\Delta\Phi_o$. Este desfase se puede determinar usando las siguientes ecuaciones:

$$\Delta\Phi_o = kn_2I_oL_{eff} \quad (2)$$

$$\Delta T_{pv} = 0.406(1 - S)^{0.25}|\Delta\Phi_o| \quad (3)$$

$$I_o = \frac{2P}{\pi\omega_o^2} \quad (4)$$

Donde ΔT_{pv} es la diferencia entre la transmitancia pico-valor o valle-pico, I_o es la intensidad inicial del haz láser, L_{eff} es el espesor de la muestra, S el diámetro de la iris, P es la potencia del haz incidente y k es vector de onda [6].

$$\Delta Z_{pv} = 1.7z_o \quad (5)$$

$$z_o = \frac{k\omega_o^2}{2} \quad (6)$$

Además se puede determinar el signo del índice de refracción no-lineal a partir de la curva de transmitancia normalizada que se obtiene al realizar el barrido. En la figura 2, se muestra una curva característica para materiales con índice de refracción no-lineal negativo (línea punteada) y positivo (línea continua) al realizar un barrido usando la técnica Z-Scan.

Fig. 2. Curva de transmitancia normalizada realizando un barrido de $-Z$ a $+Z$ para 2 materiales con distinto signo de índice de refracción no lineal: la curva punteada (azul) corresponde a un material con índice de refracción no-lineal negativo ($n_2 < 0$) y la curva continua (verde) corresponde a un material con índice de refracción no-lineal positivo ($n_2 > 0$).

Si se realizara un barrido de $+Z$ a $-Z$, se obtendrían las curvas invertidas para cada caso. Es decir, cuando el material posea un índice de refracción no-lineal negativo se obtendría primero un valle seguido de un pico, en cambio para materiales con índice de refracción positivo encontraríamos primero un pico seguido del valle.

3. Montaje experimental

La técnica Z-Scan por transmisión se implementó como se muestra en la figura 1. Para esto se usó un láser de Nd:YAG emitiendo en 532 nm (segundo armónico) como fuente de excitación para la muestra. Se utilizó una lente de convergente con distancia focal de $f = +10\text{ cm}$ marca Edmund Optics, una iris de 0.01 mm de diámetro, un fotodetector de área grande de 1 cm^2 , una tarjeta de adquisición de datos USB-6008 de la National Instruments, una cubeta de vidrio de espesor 1 mm y un banco de desplazamiento lineal. Para el desplazamiento de la muestra al banco de desplazamiento lineal se le incorporo un motor paso a paso de 1.8° por paso, es decir 200 pasos por giro con el fin de poder realizar movimientos precisos y controlados; por cada paso la muestra se desplaza 0.21 mm .

A cada muestra se le realizó un barrido de 20cm a lo largo de eje z. Para la adquisición de los datos se desarrolló una interfaz en LabVIEW (Fig. 3) según el diagrama de flujo que semuestra en la figura 4.

Fig. 3. Interfaz de usuario diseñada en LabVIEW para la técnica Z-Scan donde se muestra con: a) Señal en tiempo real de la transmitancia en función del tiempo, b) la distancia a desplazarse por la muestra, c) el sentido en el cual se desplaza la muestra ya sea de ida o vuelta y d) el campo para ingresar la ruta de almacenamiento del archivo generado (.dat, .xls, .xlsx).

Fig. 4. El diagrama de flujo del programa elaborado en LabVIEW, el cual funciona de la siguiente manera: Primero se configura la distancia que se desea desplazar la muestra, el sentido en que se moverá y la ruta de almacenamiento, una vez configurado esto se generan los pulsos para el motor PaP y se recibe la señal proveniente del fotodetector y por último todos estos datos son tabulados y almacenados en un archivo (.dat, .xls o .xlsx).

4. Resultados y análisis experimentales

Se realizó el estudio para 3 muestras distintas de aceite de oliva extra virgen puro y diluido en alcohol etílico a concentraciones del 75% y 50%. Durante la medida se mantuvo una potencia de excitación del haz láser de 65 mW y se realizaron barridos de 20 cm con pasos de $0,21\text{ mm}$. Los barridos se realizaron de $+Z$ a $-Z$.

Fig. 5. Curva de transmitancia normalizada obtenida para el aceite de oliva extra virgen y para la celda de vidrio.

La figura 5 corresponde a una curva de transmitancia normalizada para el aceite de oliva extra virgen y un escaneo en iguales condiciones para la celda de vidrio contenedora vacía. En ambos casos se realizó un barrido de 20cm simétrico al foco de la lente ($f=+10$ cm) con una potencia fija y estable de $65 \pm 0,05$ mW. En la figura se puede observar que la celda de vidrio vacía no presenta respuesta no lineal en las condiciones del experimento que contribuyan a “enmascarar” la respuesta no lineal presentada por el aceite de oliva estudiado. La curva, de color negro, obtenida muestra un comportamiento no-lineal por parte del aceite. Además el signo del índice de refracción no-lineal es negativo, recordando que se realizó un barrido de $+Z$ a $-Z$. A partir de las curvas obtenidas se obtiene de manera experimental el valor de $\Delta\Phi_o$ y ω_o^2 . Analizando la siguiente figura 6.

Usando las ecuaciones (5) y (6) se puede obtener valor de ω_o^2 de manera experimental.

$$\omega_o^2 = \frac{2\Delta Z_{pv}}{1.7k} \quad (7)$$

A partir del valor de ω_o^2 se obtiene I_o .

$$I_o = \frac{1.7Pk}{\pi\Delta Z_{pv}} \quad (8)$$

De la ec. (3) se puede determinar $\Delta\Phi_o$ y si se tiene en cuenta la siguiente consideración $S \ll 1$ se llega a la siguiente expresión:

$$|\Delta\Phi_o| = \frac{\Delta T_{pv}}{0.406} \quad (9)$$

Si se remplazan estos valores en la ec. (1) y despejando se obtiene:

$$n_2 = \frac{\Delta T_{pv}\Delta Z_{pv}\lambda^2}{2.7608\pi PL_{eff}} \quad (10)$$

La ec. (10) permite calcular el índice de refracción no-lineal del aceite de oliva a partir de los valores de ΔZ_{pv} y ΔT_{pv} . Se puede notar que $n_2 \propto \Delta T_{pv}$. Durante las medidas se usó un láser de Nd:YAG emitiendo en su segundo armónico $\lambda = 532$ nm con una potencia estable de $P = 65 \pm 0.05$ mW y un $L_{eff} = 1 \pm 0.05$ mm. La ec. (10) se puede reducir a la siguiente expresión:

$$n_2 = \Delta T_{pv}\Delta Z_{pv}(5.0202 \times 10^{-8}) \frac{cm}{W} \quad (11)$$

Fig. 6. Análisis de una curva de transmitancia para un material con índice de refracción no-lineal negativo. Los valores de ΔT_{pv} y ΔZ_{pv} son la diferencia entre la transmitancia pico-valle o valle-pico y la diferencia entre la posición entre pico-valle y valle-pico respectivamente.

En la figura 7, se nota que la presencia del alcohol etílico en la muestra genera variaciones en las propiedades ópticas del material; lo cual serviría como objeto de estudio para obtener, en la proporción adecuada, un resultado del índice de refracción no lineal en especial. El cual puede posteriormente ser estudiado en función de la potencia de excitación del láser o en función de la longitud de onda longitud de onda (λ) con el fin de observar que cambio se presentan en la muestra.

Fig. 7. Curva de transmitancia para distintas concentraciones del aceite de oliva extra virgen en alcohol etílico, para cada una de las muestras se realizó un barrido de 20cm simétrico al foco de la lente, con, $L_{eff} = 1 \pm 0.05mm$

A continuación se muestran los resultados obtenidos del índice de refracción no-lineal para las distintas muestras de aceite de oliva. Se usó un láser de Nd: YAG con $\lambda = 532 \text{ nm}$ (segundo armónico), $P = 65 \text{ mW}$, $\omega = 63.04 \mu\text{m}$ y $I_o = 1041,26 \text{ W/cm}^2$.

TABLA 1. Valores de ΔT_{pv} y ΔZ_{pv} obtenidos a partir de la curva de transmitancia normalizada para cada muestra

AO(%)	$\Delta Z_{pv}(cm)$	ΔT_{pv}
100	3,99	0,23122
75	3,99	0,17467
50	3,99	0,15655

TABLA 2. Índice de refracción no-lineal para el aceite de oliva extra virgen puro y diluido en alcohol etílico a distintas concentraciones

<i>AO (%)</i>	<i>n₂ (cm²/W)</i>	<i>Signo</i>
100	$4,63 \times 10^{-8}$	<i>Negativo</i>
75	$3,49 \times 10^{-8}$	<i>Negativo</i>
50	$3,13 \times 10^{-8}$	<i>Negativo</i>

Los resultados de los barridos realizados a las 3 muestras muestran un comportamiento óptico no-lineal por parte de ellas. Todas la muestras presentan un índice de refracción no lineal con signo negativo, indicando esto que existe una contribución pequeña por el efecto de lente térmica, la cual es producida debido a que parte de la energía del haz laser, en este caso de 532 nm, es absorbida por el medio en el cual se propaga. Esta absorción genera un incremento de la temperatura del medio induciendo un cambio en el índice de refracción en un factor usualmente denominado dn/dT [7,8]. En el material estudiado y recordando que se utilizó una única celda de espesor de 1,0mm, y una longitud de onda de 532nm de un láser continuo se estima que el factor dn/dT es del orden de $2.23 \times 10^{-10} \text{ } ^\circ\text{C}$.

5. Conclusión

Las propiedades ópticas no-lineales del aceite de oliva fueron caracterizadas mediante la técnica Z-Scan para $\lambda = 532\text{nm}$. A partir de la curva de transmitancia normalizada se obtuvo el índice de refracción no-lineal, magnitud y signo para distintas concentraciones de aceite de oliva diluido en alcohol etílico exhibiendo un índice de refracción no-lineal negativo en todos los casos estudiados con una disminución considerable en su magnitud a medida que se disminuye la concentración de aceite de. Este resultado obtenido evidencia una variación en las propiedades ópticas no-lineales del aceite de oliva permitiendo esto el poder obtener un valor determinado para una concentración particular.