



**ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN DE TRANSDUCTORES BASADOS EN
CRISTALES PIEZOELÉCTRICOS Y SU UTILIZACIÓN EN ESPECTROSCOPIA
FOTOACÚSTICA EN FASE LÍQUIDA**

MARÍA DEL ROSARIO PÉREZ TREJOS

**Universidad Industrial De Santander
Facultad De Ciencias
Escuela De Física
Bucaramanga
2008**

**ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN DE TRANSDUCTORES BASADOS EN
CRISTALES PIEZOELÉCTRICOS Y SU UTILIZACIÓN EN ESPECTROSCOPIA
FOTOACÚSTICA EN FASE LÍQUIDA**

MARÍA DEL ROSARIO PÉREZ TREJOS

**Proyecto de Grado presentado como requisito para
Optar al título de FÍSICA**

**Director:
Msc. Rafael Cabanzo Hernández**

**Universidad Industrial De Santander
Facultad De Ciencias
Escuela De Física
Bucaramanga
2008**

A mis padres:

*Meisner Trejos Auila
Ernesto Pérez Carvajal*

A mis hermanas

*Paola Andrea Pérez Trejos
y Leidy Karina Pérez Trejos.*

*Quienes con su apoyo incondicional,
sus consejos, amor y paciencia,
hicieron posible que alcanzara tan
anhelada meta*

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa su agradecimiento a:

- Mis padres y hermanas por su apoyo incondicional, motivación, fortaleza y por enseñarme a hacer mejor persona.
- Msc. Rafael Cabanzo, no hay palabras para expresarle mi gratitud por su confianza, paciencia, orientación y apoyo en la realización de este proyecto.
- Todas las personas que conforman el grupo del Laboratorio de Espectroscopia Atómica Molecular (LEAM), por su compañerismo y colaboración.
- Edilia Quintero y personal administrativo de la Escuela de Física de la Universidad Industrial de Santander por su colaboración.
- A los grupos: Ciencias de Materiales Biológicos y Semiconductores (CIMBIOS) en especial al Profesor David Miranda y al Laboratorio de Óptica y tratamientos de Señales por la ayuda prestada.
- Todas las personas que de una u otra forma contribuyeron al logro de mis objetivos.
- Mis amigos.

|

CONTENIDO

	Pág.
LISTA DE FIGURAS	vii
INTRODUCCIÓN	1
<u>1. CONCEPTOS FUNDAMENTALES</u>	3
1.1 GENERACIÓN DE LA SEÑAL FOTOACÚSTICA	6
<u>2. PARTE EXPERIMENTAL</u>	11
2.1 MONTAJE EXPERIMENTAL IMPLEMENTADO	11
<u>3. ANÁLISIS Y RESULTADOS</u>	13
4. CONCLUSIONES	27
BIBLIOGRAFÍA	28

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Algunos efectos fototérmicos originados por la absorción de radiación en una muestra	4
Figura 2. Canales de deexcitación térmica	6
Figura 3. Montaje implementado en técnica Fotoacústica pulsada en fase líquida	12
Figura 4. a. Señal Fotoacústica típica obtenida cuando se utiliza como detector el piezoeléctrico de longitud 4.2mm. b. Señal típica del Fotodetector	13 13
Figura 5. Señal fotoacústica versus energía del pulso láser para el detector PZT de 4.2mm de longitud	14
Figura 6 Sensibilidad promedio para cada detector versus longitud del cristal piezoeléctrico	15
Figura 7. Señal Fotoacústica típica obtenida cuando se utiliza como detector el piezoeléctrico de longitud 1mm	16
Figura 8. Señal de fluorescencia de la sulforhodamine B en etanol	16

TÍTULO: ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN DE TRANSDUCTORES BASADOS EN CRISTALES PIEZOELÉCTRICOS Y SU UTILIZACIÓN EN ESPECTROSCOPIA FOTOACÚSTICA EN FASE LÍQUIDA.*

AUTOR: MARÍA DEL ROSARIO PÉREZ TREJOS.**

PALABRAS CLAVES: Procesos de relajación no radiativos, Espectroscopia Fotoacústica, Efecto Piezoeléctrico, Cristales Piezoeléctricos.

DESCRIPCIÓN:

El término fotoacústica (PA) u optoacústica (OA), se refiere a la generación de ondas acústicas en una muestra debido a la absorción de radiación electromagnética en forma pulsada o modulada. Los canales de relajación no radiativos, convierten parte de la energía absorbida en calor, lo cual da lugar a calentamiento del sistema y como consecuencia se generan ondas acústicas. Para detectar la onda acústica se utilizan detectores de muy buena sensibilidad. Particularmente, como transductores se utilizan cristales piezoeléctricos. Las tensiones mecánicas aplicadas al cristal producen polarización de las moléculas, lo que se conoce como efecto piezoeléctrico. Si se desea trabajar con medios en fase líquida, los cristales se deben encapsular en un metal, normalmente acero. El detector fotoacústico se pone en contacto directo con la pared externa de la cubeta, y es la pieza clave del sistema, él se encarga de convertir la señal acústica en una señal eléctrica, la cual posteriormente es amplificada, registrada en un osciloscopio y almacenada para su posterior análisis. En este trabajo se presentan los resultados obtenidos en la señal fotoacústica cuando se varía la longitud de los cristales piezoeléctricos (transductores), manteniendo constante los demás factores experimentales con el objetivo de observar dependiendo de la señal generada, si se produce cambios en la sensibilidad de los mismos.

*Trabajo de Grado

**Facultad de Ciencias. Escuela de Física. Director: Msc Rafael Cabanzo Hernández.

TITLE: STUDY AND CHARACTERIZATION OF TRANSDUCERS BASED ON PIEZOELECTRIC CRYSTALS AND THEIR USE IN PHOTOACOUSTIC SPECTROSCOPY IN LIQUID PHASE.

AUTOR: MARÍA DEL ROSARIO PÉREZ TREJOS.*

KEY WORDS: Non radiativa processes of relaxation, Photoacoustic Spectroscopy, Piezoelectric Effect, Piezoelectric Crystal

DESCRIPTION

The term photoacoustics (PA) or optoacoustic (OA) means generation of acoustic waves on a sample due to the absorption of electromagnetic radiation in pulse or modulated form. The relaxation through non-radiative channels convert the energy absorbed in heat, which gives place to oscillating warming (heating) of the sample and as consequence acoustic waves are generated. In order to detect the acoustic wave exist several detectors with very good sensibility properties. Particularly, piezoelectric crystals are the most used as transducers. The mechanical tensions applied to the crystal produce polarization of the molecules, which is known as piezoelectric effect. If one employs samples in liquid phase, the crystals must be encased in a metal, normally steel. The photoacoustic detector is placed in direct contact with the external wall of the cuvette, this coupling is the key piece of the experimental system setup. The detector converts the acoustic signal into an electrical signal, which later is amplified, registered and stored in an oscilloscope. In this work we show the results obtained in the photoacoustic signal when the length of the piezoelectric crystals is changed (transducers), maintaining other experimental factors constant with the objective to observe depending on the generated sign, if one produces changes in the sensibility of the same ones

*Graduation Project

**Faculty of Ciencias. School of Physics. Director: Msc Rafael Cabanzo Hernández.

INTRODUCCIÓN

El efecto fotoacústico fue descubierto por el físico estadounidense Alexander Graham Bell (1847-1922) en 1880. Él observó que se producía un sonido audible cuando la luz solar modulada mecánicamente incidía sobre un material absorbente. Durante casi un siglo, la posibilidad de convertir luz en sonido fue tomada solo como curiosidad. En la década de 1930, el efecto retomó el interés científico, cuando se percibió que podría ser usado para el análisis de gases, naciendo así la espectroscopía fotoacústica, una técnica que adquirió aún más impulso a finales de los años 70, con el desarrollo de los láseres, los progresos en el campo de la electrónica y el desarrollo de ciertos materiales que maximizan el efecto piezoeléctrico.

Estos ceramicos piezoelectricos son materiales utilizados comunmente en la fabricación de transductores ultrasónicos para la parte médica y estudio no destructivo de muestras. Un transductor piezoeléctrico es un sistema que convierte energía mecánica en energía eléctrica a través del efecto piezoeléctrico directo y viceversa por medio del efecto piezoeléctrico inverso. En el presente trabajo se estudia como la sensibilidad del piezoeléctrico esta relacionada con la longitud del mismo, siempre que se mantengan las demás condiciones constantes.

Enmarcados en este contexto el Laboratorio de Espectroscopia Atómica y Moléculas (LEAM) de la Universidad Industrial de Santander durante varios años ha realizado estudios en Espectroscopía convencional, hoy por hoy está ampliando sus estudios hacia otro tipo de Espectroscopía la cual utiliza los procesos no radiativos y se conoce como Espectroscopia Fotoacústica.

Este libro consta de tres capítulos; el primero de ellos tiene como objetivo dar a conocer los conceptos fundamentales y la fenomenología del efecto fotoacústico.

En el segundo se muestra el montaje y se establecen las condiciones para la adquisición de datos y una breve explicación de la forma en la cual deben ser ensamblados los detectores fotoacústicos. En el ultimo capitulo se hace el análisis de datos y se establecen los resultados obtenidos.

Finalmente se presenta las conclusiones, esperando que estas contribuyan al mejoramiento de la implementación de la técnica Espectroscopia Fotoacústica en fase líquida.

1. CONCEPTOS FUNDAMENTALES

El término fotoacústica (PA) u optoacústica (OA), se refiere a la generación de ondas acústicas en una muestra debido a la absorción de radiación electromagnética en forma pulsada o modulada. La señal se origina en la fracción de energía liberada como calor mediante los procesos no radiativos a través de los cuales el sistema atómico-molecular regresa al estado fundamental. Esta técnica espectroscópica es complementaria a las técnicas espectroscópicas convencionales, en las cuales se utilizan los procesos radiativos (absorción, emisión fluorescencia, etc.).

El efecto fotoacústico fue descubierto por A. G. Bell en 1880, quien observó que se producía un sonido audible cuando la luz solar modulada mecánicamente incidía sobre un material absorbente. Motivados por tal descubrimiento, Tyndall y Röntgen (1881) encontraron que la señal acústica también se puede producir cuando se ilumina, con un haz de luz intermitente, una celda en cuyo interior se encuentra encerrado un gas. A partir de estas observaciones se experimentó con una variedad de sólidos, líquidos y gases, dejando su descripción como una curiosidad científica. Quince años después el efecto fotoacústico fue reexaminado y se encontró que los fotones absorbidos por el gas eran convertidos por las moléculas del sistema en energía cinética (calor). Mercadier quien también experimentó con tal efecto, concluyó que el sonido se debía al “movimiento vibratorio determinado por el calentamiento y enfriamiento alterno producido por la radiación intermitente”

Después de noventa años Allan Rosencwaig y Allen Gersho demostraron que la principal fuente de generación de señal fotoacústica es el flujo de calor, esto debido a que una onda térmica es la respuesta del medio a una fuente de

calentamiento periódico. Cuando la energía radiante incide sobre la superficie de un sólido opaco, el sólido absorbe energía y parte de ella será transformada en calor. Si la fuente de energía es modulada, una variación periódica de temperatura se produce en la muestra.

La señal fotoacústica se origina en los efectos fototérmicos, los cuales son causados por el calentamiento de la muestra después de haber absorbido energía óptica. Algunos efectos fototérmicos originados por la absorción de radiación en una muestra se pueden observar en la Figura 1^[2].

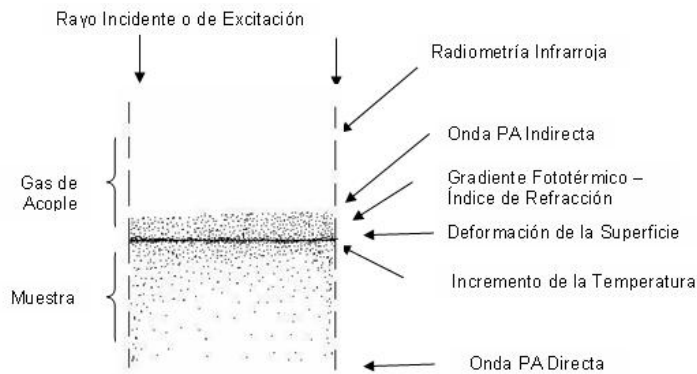


Figura 1. Algunos efectos fototérmicos originados por la absorción de radiación en una muestra

El efecto más rápido y fácil para medir es el incremento de Temperatura, también denominado calorimetría óptica. Para su detección se utilizan detectores piroeléctricos y termocuplas, generalmente esta variación es del orden de 10^{-4} K.

La Lente Térmica, se origina debido a la dependencia del índice de refracción con

la temperatura $\eta(T)$, generalmente se genera una lente divergente, pues: $\frac{d\eta}{dT} < 0$

La presencia de la lente térmica hace que un segundo haz (con longitud de onda a la cual la muestra es transparente) sea desenfocado y por lo tanto se observará

variación de la intensidad en el detector, causada por la presencia de la lente térmica.

El calentamiento de la Superficie causa deformación debido a la expansión térmica, esta deformación puede ser de 10^{-3} Å. Los desplazamientos se pueden medir haciendo incidir un haz láser en la superficie, la luz reflejada varía cuando la superficie esta deformada por efecto fototérmico.

Los efectos fototérmicos y particularmente el efecto fotoacústico (PA) se puede utilizar para implementar una técnica directa no destructiva que permite caracterizar materiales en cualquiera de las fases de agregación, sólida, líquida o gaseosa. Esto es una ventaja sobre otras técnicas, las cuales hacen una relación entre al menos dos haces, en el que uno de ellos es relativamente débil. La detección fotoacústica como se observa en la Figura 1 se puede clasificar en directa e indirecta. En la detección fotoacústica directa, la onda acústica se produce y detecta en la muestra donde es absorbida la radiación. En la detección fotoacústica indirecta la onda acústica se genera en un medio de acople (gas o líquido) adyacente a la muestra, y se debe a transferencia de calor de la muestra al medio de acople^[6]. La generación fotoacústica se puede clasificar de acuerdo al modo de excitación: Modo modulado de la onda continua (cw), y modo pulsado. En el modo modulado, la señal se analiza en el dominio de la frecuencia, amplitud y fase. En el modo pulsado la señal es adquirida y analizada en el dominio del tiempo.

Otra aplicación del efecto fotoacústico se encuentra en el seguimiento de los procesos de deexcitación no radiativos. Cuando un sistema absorbe radiación, parte de la energía es liberada rápidamente como calor hacia el medio (Deexcitación térmica). Existen otros procesos que pueden contribuir a la

generación de calor, dichos procesos se muestran en la Figura 2 [2]. Procesos como luminiscencia, fotoquímica, fotoelectricidad, entre otros, pueden contribuir a deexcitación térmica retardada (calor lento).

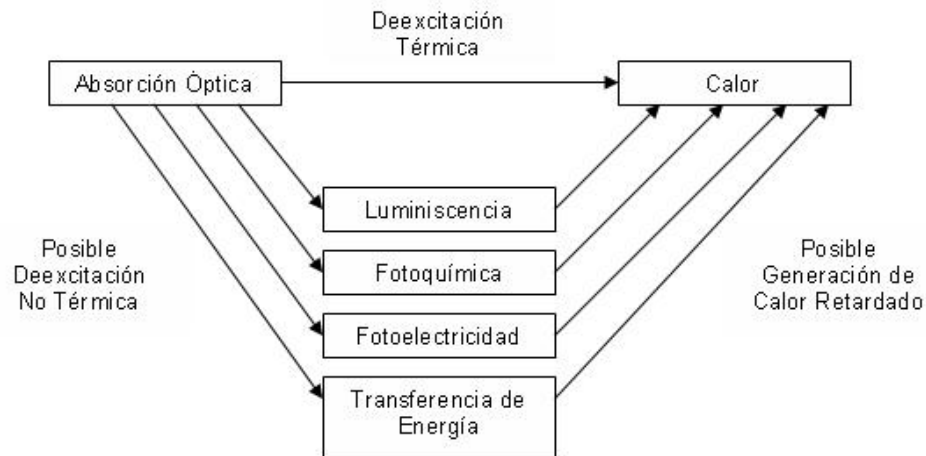


Figura 2. Procesos que se originan después de la absorción de radiación.

1.1 GENERACIÓN DE LA SEÑAL FOTOACÚSTICA

En este trabajo se escogió el modo pulsado, donde generalmente el tiempo de excitación es corto ($<1 \mu\text{s}$) y la distancia de propagación del pulso acústico durante la excitación es típicamente mucho menor que las dimensiones de la muestra; por eso en la mayoría de los casos la forma del pulso fotoacústico es independiente de las reflexiones en las fronteras (paredes), y a menudo la muestra se considera de extensión infinita^[6]. Si el coeficiente de absorción $\alpha \ll 1$, para la longitud de onda de excitación, se tiene absorción débil. En este caso, la onda acústica generada es de tipo **cilíndrico** si la geometría del haz láser es cilíndrica; si el caso es el opuesto (absorción fuerte) entonces se tiene una absorción superficial que trae como consecuencia la generación de ondas acústicas **esféricas** con centro en el punto de incidencia del láser en la muestra.

Las soluciones que se trabajan corresponden a soluciones diluidas, es decir, poseen bajo coeficiente de absorción (α) para la longitud de onda 532nm, esta

condición permite suponer que las propiedades ópticas de la solución las determina el soluto mientras que las propiedades termoelásticas las determina el solvente.

La teoría de la espectroscopia fotoacústica pulsada ha sido considerada por varios autores, es por ello que se seguirán los trabajos de Patel y Tam, Silvia E. Braslavsky and G. E. Heibel ^[1,2,4,9] ya que estos trabajos hacen una discusión general de la espectroscopia fotoacústica pulsada en fase líquida de muestras diluidas

Bajo estas condiciones, el haz láser de radio R atraviesa una celda de longitud L que contiene la muestra en estado líquido, y a una distancia r medida perpendicularmente al haz, se encuentra un transductor piezoeléctrico, el cual detecta la onda acústica.

Si E_0 es la energía del pulso láser incidente, la energía absorbida por el medio con coeficiente de absorción α y longitud L ^[4]:

$$E_{abs} = E_0 [1 - \exp(-\alpha L)] \quad (1)$$

Para el caso de soluciones diluidas es decir donde $\alpha L \ll 1$; la ecuación anterior se puede aproximar a: $E_{abs} \approx E_0 \alpha L$ (2)

Si la relajación no radiativa en el medio es el único mecanismo de deexcitación, entonces E_{abs} es igual al calor generado en el medio, entonces:

$$E_{TH} = E_{abs} = \rho C_p V_1 \Delta T \quad (3)$$

Donde ρ es la densidad del solvente, C_p capacidad calorífica a presión constante del solvente, V es el volumen de la fuente acústica ($V = \pi R^2 L$ y $R = v\tau_L$), ΔT es el incremento de temperatura.

Combinando las ecuaciones (2) y (3) se obtiene:

$$\Delta T = \frac{E_0 \alpha L}{\rho V_1 C_p} \quad (4)$$

Si la expansión que se produce es isobárica y adiabática, la variación del volumen ΔV , después del pulso láser será [2]:

$$\pi(R + \Delta R)^2 L - \pi R^2 L = \beta V_1 \Delta T \quad (5)$$

Donde β es el coeficiente de expansión volumétrica, ΔR es el incremento del radio de la fuente acústica, y si $\Delta R \ll R$, lo cual es cierto en todos los casos se

considera, entonces:

$$\Delta R \approx \frac{R}{2} \beta \Delta T \quad (6)$$

Combinando las ecuaciones anteriores se obtiene:

$$\Delta R = \frac{E_0 \alpha \beta}{2\pi\rho v \tau_L C_p} \quad (7)$$

Esta expansión produce una onda de presión la cual viaja radialmente desde el cilindro iluminado a la velocidad del sonido v . El cambio de presión p en un punto a la distancia r está relacionada con ΔR por medio de la formula [4]:

$$p = K * \frac{\beta v}{C_p} E_0 \alpha \quad (8)$$

Donde el factor K es una constante para la configuración geométrica del experimento y forma fija del pulso láser [6,9].

Como la señal fotoacústica S proveniente del transductor es proporcional al pico de presión, se tiene:

$$S = K \alpha E_0 (1 - 10^{-A}) \quad (9)$$

Donde, K es una constante que contiene los parámetros experimentales: electrónicos, de acople, de geometría y del detector, es decir:

$$K = K_{electronica} K_{geometrica} K_{acople} K_{detector} \quad (10)$$

Es por ello que si se mantienen constantes todos los parámetros, de la ecuación (10) se puede observar que la señal fotoacústica en (9) es directamente proporcional a la energía del haz incidente.

La ecuación (9) es la base de la espectroscopia fotoacústica. El espectro fotoacústico se puede obtener mediante un barrido del pulso láser en una región determinada de longitudes de onda, midiendo la relación de señales S y graficando S contra la longitud de onda del láser. Se puede apreciar que para un solvente fijo ($\beta v / C_p$ es constante); S es proporcional al coeficiente de absorción α .

En la derivación de esta ecuación, se asumió que el tiempo de tránsito acústico $\tau_a = 2R / v$ es menor que la anchura del pulso láser τ_p . En caso opuesto de τ_a mayor que τ_p Tam y Patel, obtienen una ecuación similar a la ecuación (8), excepto que v se reemplaza por v^2 .

Cuando los tiempos de vida de los procesos no radiativos, τ_{NR} , son del orden o mayores que el tiempo efectivo de tránsito acústico, $\tau'_a = 2R/v$, la ecuación (9) se debe modificar, introduciendo los tiempo de vida de los procesos no radiativos y adicionalmente la forma del pulso de presión es ahora función de la evolución del calor, es decir, de los tiempos en los que el sistema libera calor hacia el medio a través de los diferentes canales no radiativos, cada uno de los canales de deexcitación con su propio tiempo de vida.

En conclusión, la evolución temporal de la señal fotoacústica, su amplitud y duración, dependen por un lado de los parámetros externos propios del experimento (τ_p y τ_a) y de la cinética de los procesos no radiativos que se presentan en la muestra, a través de τ_{NR} . Debido a lo anterior, se puede redefinir

la variable α , la cual se interpreta como la fracción de energía liberada como calor hacia el medio, dentro del tiempo de resolución del experimento.

El elemento fundamental del detector es el cerámico piezoeléctrico, el cual se encarga de convertir la señal acústica en una señal eléctrica proporcional a la señal de entrada.

El efecto piezoeléctrico (del griego piezein, "estrujar o apretar") es un fenómeno que se presenta en determinados cristales que al ser sometidos a esfuerzos mecánicos adquieren polarización eléctrica, dando origen a una diferencia de potencial y cargas eléctricas en su superficie

Actualmente los materiales cerámicos más conocidos y utilizados son los que se conocen con el nombre de PZT constituidos por titanatos zirconatos de plomo. La posición líder de los PZT se debe a su potente efecto piezoeléctrico y elevado punto de Curie, junto a la amplia gama de propiedades, dichos cerámicos son utilizados como sensores y como actuadores en muchas áreas de la ciencia tales como: Medicina, Ingeniería Eléctrica, Ingeniería Mecánica, Ingeniería Aeroespacial, Bioelectrónica, Ingeniería de Materiales, entre otras.

2. PARTE EXPERIMENTAL

En este capítulo se describe el montaje experimental implementado para la adquisición y análisis de la señal fotoacústica.

2.1 MONTAJE EXPERIMENTAL IMPLEMENTADO

La Figura 3 muestra el montaje experimental implementado en el laboratorio.

La fuente de excitación es un láser (1) Nd:YAG (Spectra Physics, Indi), con longitud de onda 532 nm, ancho temporal del pulso de 8 ns, y operado a una frecuencia de 10 Hz, con energía de 150mJ por pulso. El haz se hace incidir sobre un prisma Pellin Brocca (2) el cual rota el haz en un ángulo de 90 grados y elimina remanentes de radiación de los armónicos. El haz atraviesa un diafragma, una combinación de filtros neutro de densidad variable (3), una placa $\lambda/2$ (4) y un polarizador Glan Taylor (5); todos estos elementos permiten variar la energía del haz láser en forma precisa. El diámetro del haz se fija en 1mm mediante un orificio apropiado (6). Un divisor de haz (7), desvía aproximadamente el 50% del haz a un medidor de energía, fotómetro (Newport Mod.1815C), dotado con un fotodetector (Newport Modelo 818 Series) (8), la señal detectada por el fotodetector es proporcional a la energía suministrada al sistema, esta señal se almacena en el osciloscopio para posteriores cálculos. El haz transmitido se hace incidir perpendicularmente sobre una celda de cuarzo 10X10X45mm del tipo convencional para absorción (9).

Los transductores que se desean caracterizar son piezoeléctricos de 8mm de diámetro y de longitud variable, encapsulado en un cilindro de acero según la descripción de Tam y Patel^[1,2]. El transductor (10) se encuentra aprisionado contra

la pared de la celda en una configuración de 90 grados y para mejorar el acople de impedancias se coloca entre este y la celda una delgada capa de grasa de silicona. La señal generada por los transductores es proporcional a la onda de presión generada en la muestra y detectada en las paredes de la cubeta, esta señal se amplifica (11) y registra en un osciloscopio (12); y se almacena en un computador (13) para ser analizada posteriormente.

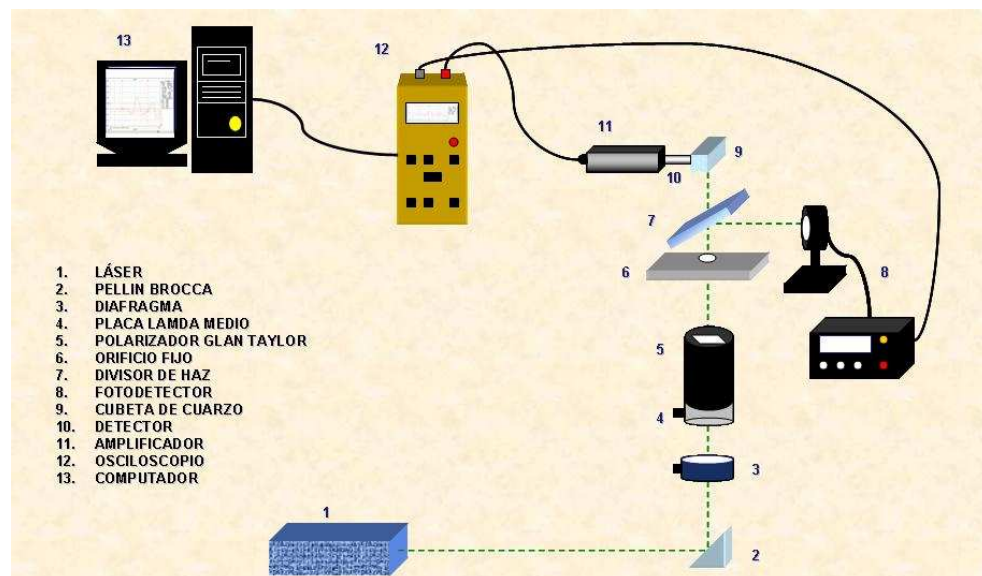


Figura 3. Montaje experimental implementado en técnica Fotoacústica pulsada en fase líquida

Los cerámicos piezoeléctricos fueron cortados a diferentes longitudes: 0.35mm, 0.5mm, 0.6mm, 1mm, 2mm, 2.5mm, 3mm, 4mm, 4.2mm, 7mm, 9.8mm con una cortadora punta de diamante. Cuando se realizan los cortes se debe tener la precaución de que las caras de los cerámicos queden perfectamente paralelas y pulimentadas.

Durante las sesiones de adquisición de datos la cubeta y todo el sistema, es inamovible, ya que pequeñas variaciones podrían originar cambios los cuales afectarían los parámetros experimentales, ver ecuación (10). La muestra de trabajo es una solución de anilina en alcohol etílico, cuya absorbancia para la longitud de onda del láser es 0.06.

3. ANÁLISIS Y RESULTADOS

Para llevar a cabo el análisis experimental, se presenta los datos y observaciones obtenidas de las señales fotoacústicas para los diferentes detectores.

La Figura 4a, es una señal fotoacústica típica obtenida con el montaje implementado. El primer pico corresponde al pulso electromagnético originado en la fuente de energía del láser. Como señal fotoacústica (S) se toma el valor pico a pico de los dos primeros lóbulos, los cuales se consideran libres de interferencias. La Figura 4b, muestra la señal originada en el fotodetector y cuya área bajo la curva es proporcional a la energía incidente del láser.

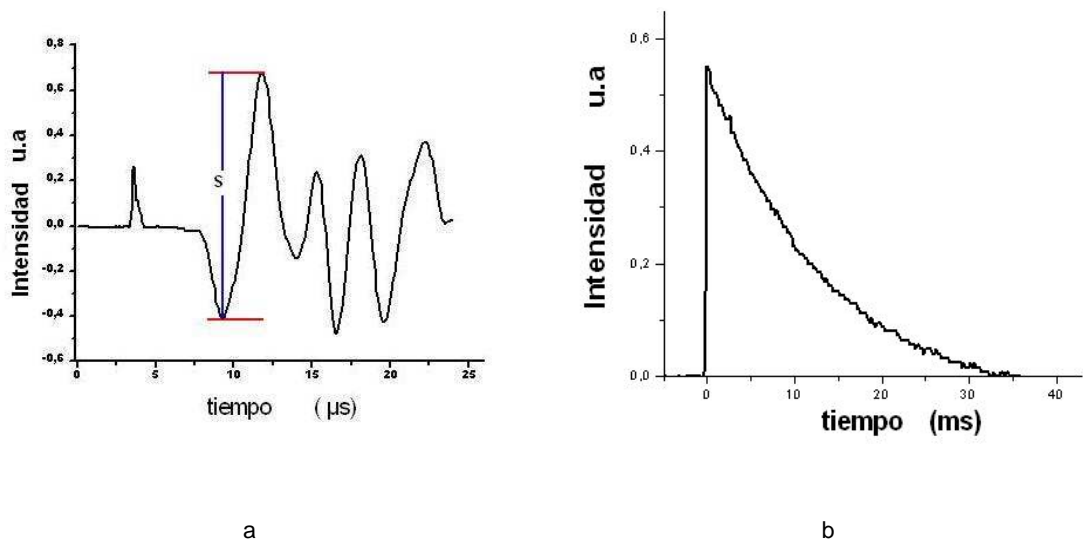
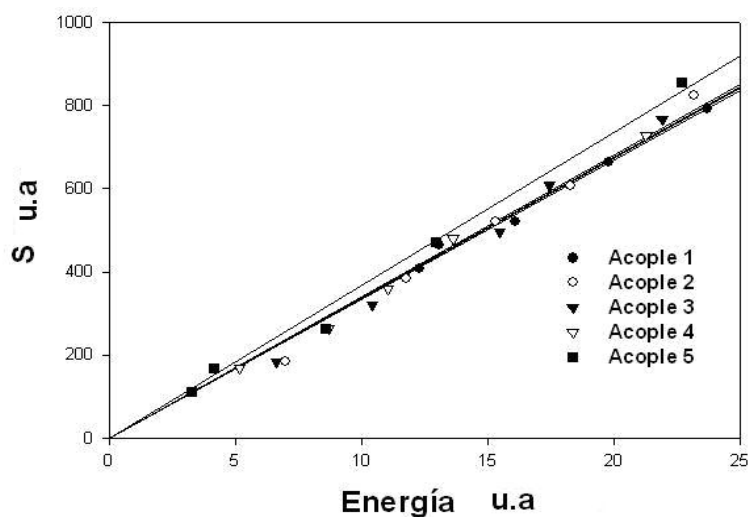


Figura 4. a. Señal Fotoacústica típica obtenida cuando se utiliza como detector el piezoeléctrico de longitud 4.2mm. b. Señal típica del Fotodetector

Como se puede apreciar en la ecuación (10), la constante K depende de parámetros experimentales. Para determinar el efecto generado por quitar y poner el detector piezoeléctrico en contacto con la cubeta (K_{acople}), se mantienen las demás condiciones en (10) constantes. Para ello se procedió a quitar y poner el detector cinco veces, y en cada ocasión se realizó una gráfica de señal fotoacústica versus energía. La Figura 5 muestra las cinco rectas obtenidas para cada acople del detector de 4.2mm de longitud. Lateral a la figura se muestran los valores de las pendientes, las cuales se interpretan como la sensibilidad del detector. Los dos últimos números corresponden al valor medio y la desviación estándar de los cinco valores, mostrando así una sensibilidad promedio de 34.37 y una desviación estándar de 1.38.



	$\frac{\partial S}{\partial E} u.a$
	33,46
	34,01
	33,73
	33,84
	36,82
$\frac{\partial S}{\partial E} prom$	34,37
u.a	
sd	1,38

Figura 5. Señal fotoacústica versus energía del pulso láser para el detector PZT de 4.2mm de longitud

En el anexo se muestran las gráficas similares para cada detector utilizado.

Al observar las gráficas de la señal fotoacústica se puede apreciar como estas aparecen en un tiempo definido después de la acción del pulso láser. Si observamos la desviación estándar en cada una de las gráficas, podemos concluir

que la señal generada por el detector piezoeléctrico varía muy poco cuando se acopla y desacopla, siempre que se tenga cuidado con la uniformidad en la capa de grasa siliconada.

El pico del pulso electromagnético formado en la señal fotoacústica para los detectores 0.35mm, 0.6mm, 1mm, 2.5mm, 7mm y, 9.8mm, ver anexo se encuentra invertido, esto es debido a que la señal en principio no dio derecha por la polarización del cristal y se procedió a invertirla.

La Figura 6. muestra la gráfica de sensibilidad versus longitud del cristal piezoeléctrico. Como barra de error se toma la desviación estándar.

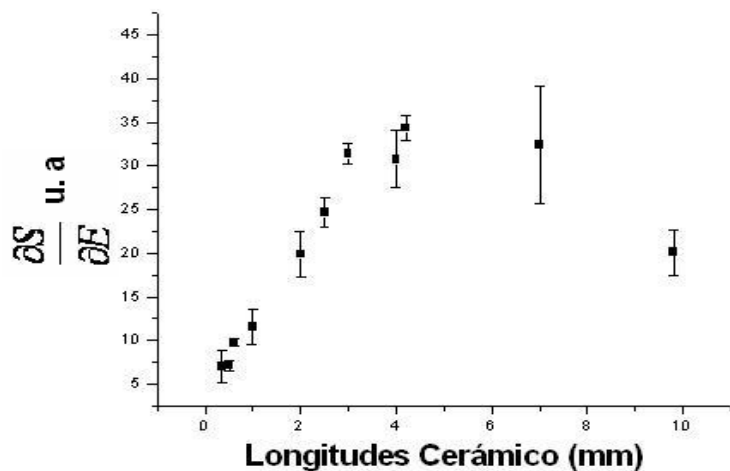


Figura 6. Sensibilidad promedio para cada detector versus longitud del cristal piezoeléctrico

Cuando la longitud del cristal piezoeléctrico crece, aumenta la sensibilidad del mismo, y alcanza su máximo de sensibilidad aproximadamente cuando el cristal es de 6mm de longitud, después la sensibilidad empieza a disminuir.

Como elemento adicional se llevaron a cabo una serie de tomas utilizando como muestra el colorante sulforhodamine B en etanol y se probó como este montaje se puede utilizar para observar simultáneamente la señal fotoacústica y la radiación emitida (fluorescencia) por la muestra. Esto resulta interesante ya que por medio de la primera técnica se puede obtener la cantidad de energía liberada como calor y por fluorescencia se obtiene la cantidad de energía emitida en forma de luz. Las Figuras 7 y 8 muestran los resultados obtenidos en esta prueba.

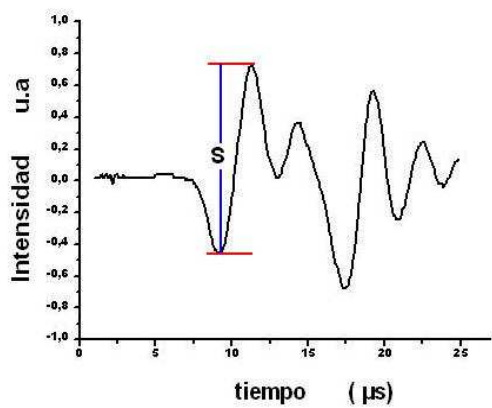


Figura 7. Señal Fotoacústica típica obtenida cuando se utiliza como detector el piezoelectrico de longitud 1mm

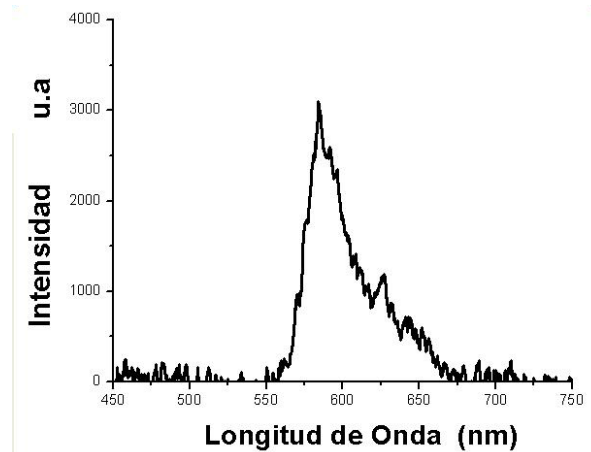


Figura 8. Señal de fluorescencia de la sulforhodamine B en etanol

ANEXO

1.- Detector de 0.35mm de longitud.

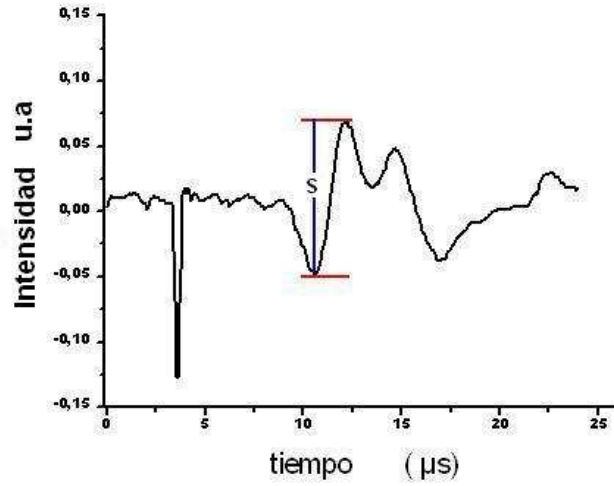
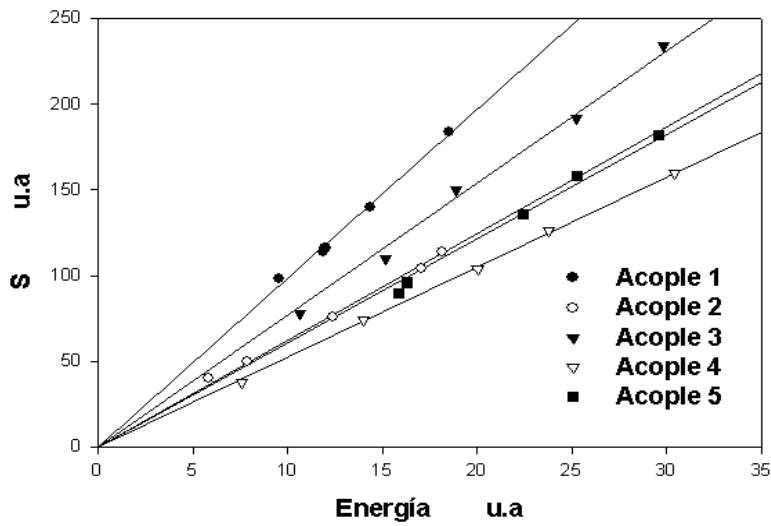


Figura.1. Señal Fotoacústica típica obtenida cuando se utiliza como detector el piezoeléctrico de longitud 0.35mm



	$\frac{\partial S}{\partial E} u.a$
	9,82972
	6,33663
	7,71086
	5,25648
	6,03303
$\frac{\partial S}{\partial E} prom$ <i>u.a</i>	7,03334
sd	1,79736

Figura 2. Señal fotoacústica versus energía del pulso láser para el detector PZT de 0.35mm de longitud

2.- Detector de 0.5 mm de longitud.

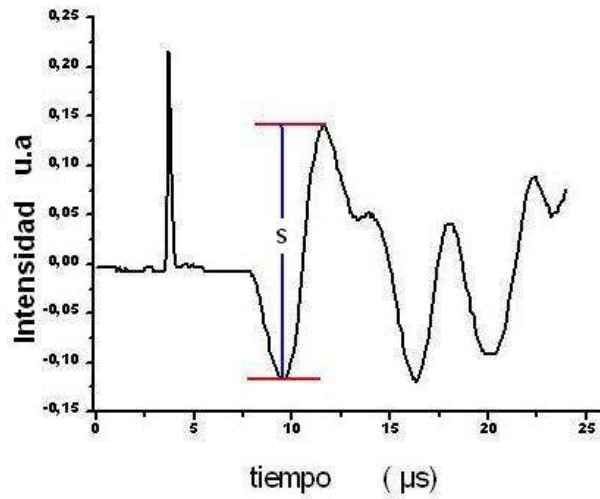
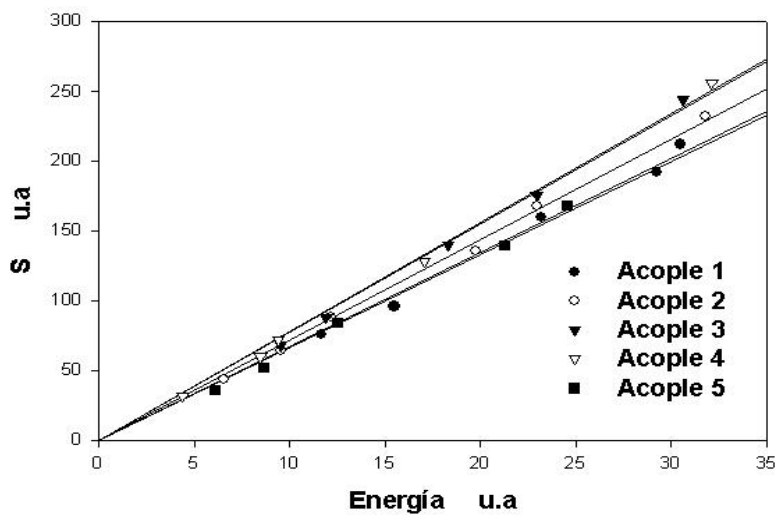


Figura 3. Señal Fotoacústica típica obtenida cuando se utiliza como detector el piezoeléctrico de longitud 0.5mm



	$\frac{\partial S}{\partial E} u.a$
	6,4949
	7,1887
	7,75793
	7,81121
	6,66245
$\frac{\partial S}{\partial E} prom$	7,18304
u.a	
sd	0,60615

Figura 4. Señal fotoacústica versus energía del pulso láser para el detector PZT de 0.5mm de longitud.

3.- Detector de 0.6 mm de longitud

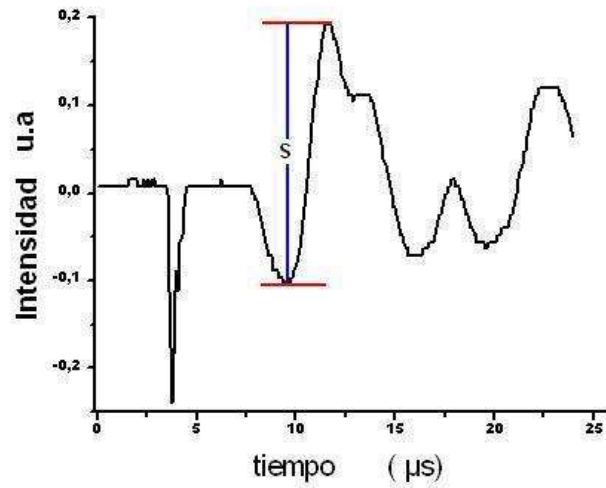
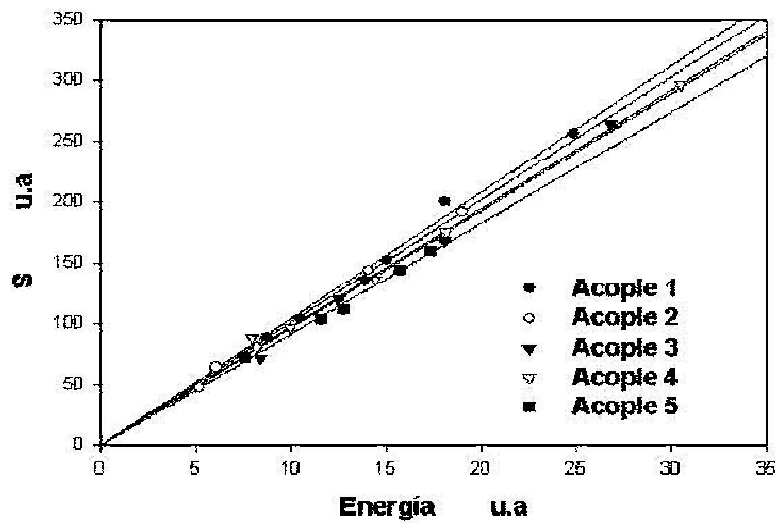


Figura 5. Señal Fotoacústica típica obtenida cuando se utiliza como detector el piezoeléctrico de longitud 0.6mm .



	$\frac{\partial S}{\partial E} \text{ u.a}$
	10,40663
	10,10638
	9,64442
	9,71898
	9,13227
$\frac{\partial S}{\partial E} \text{ prom}$	9,80174
	u.a
sd	0,48438

Figura 6. Señal fotoacústica versus energía del pulso láser para el detector PZT de 0.6mm de longitud.

4.- Detector de 1mm de longitud

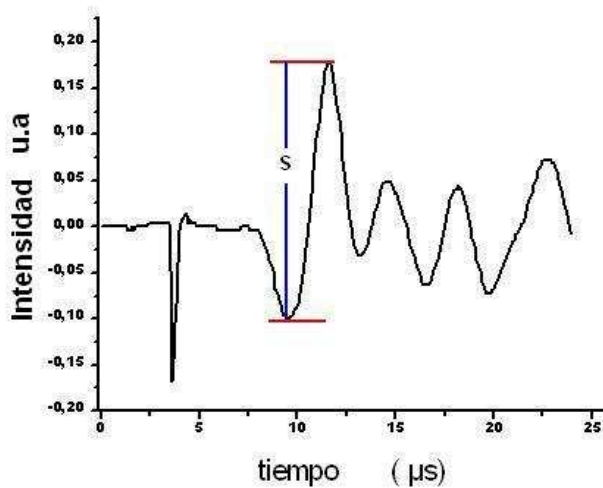
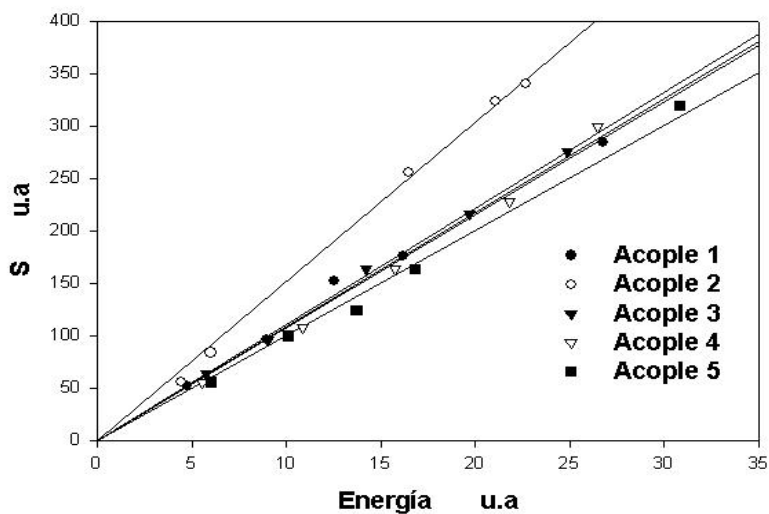


Figura 7. Señal Fotoacústica típica obtenida cuando se utiliza como detector el piezoeléctrico de longitud 1mm .



	$\frac{\partial S}{\partial E} u.a$
	10,8756
	15,1804
	11,1037
	10,7931
	10,0494
$\frac{\partial S}{\partial E} prom$ u.a	11,6004
sd	2,03998

Figura 8. Señal fotoacústica versus energía del pulso láser para el detector PZT de 1mm de longitud .

5.- Detector de 2mm de longitud

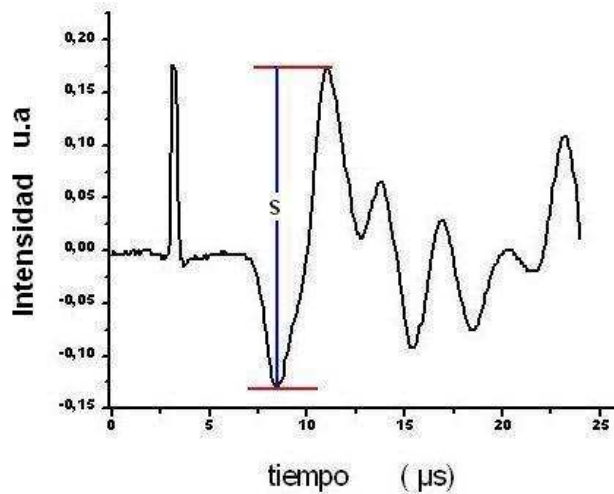
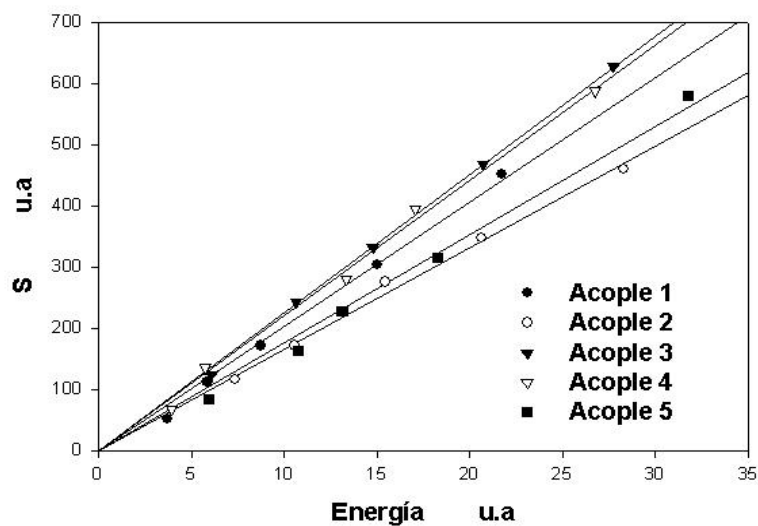


Figura 9. Señal Fotoacústica típica obtenida cuando se utiliza como detector el piezoeléctrico de longitud 2mm .



	$\frac{\partial S}{\partial E} u.a$
	20,35011
	16,63248
	22,57727
	22,12715
	17,68589
$\frac{\partial S}{\partial E} prom$	19,87458
sd	2,64132

Figura 10. Señal fotoacústica versus energía del pulso láser para el detector PZT de 2mm de longitud.

6.- Detector de 2.5mm de longitud

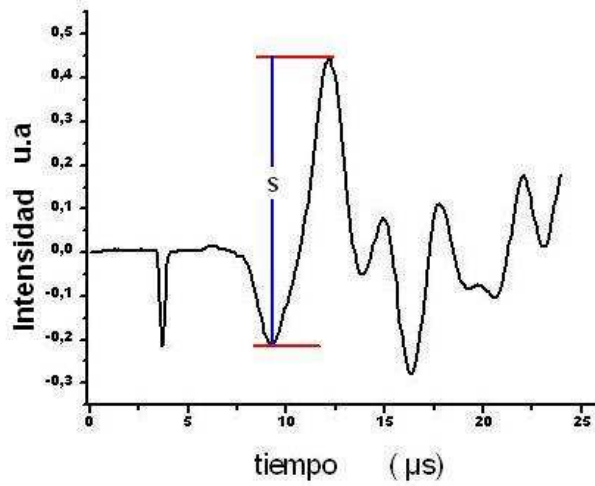
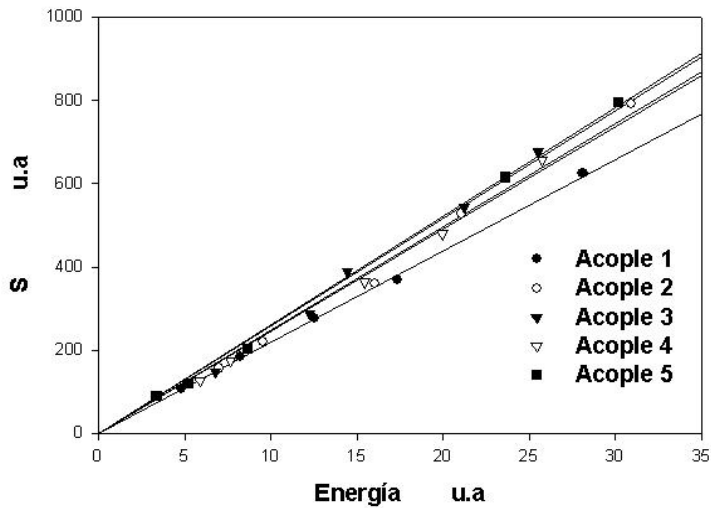


Figura 11. Señal Fotoacústica típica obtenida cuando se utiliza como detector el piezoeléctrico de longitud 2.5mm .



	$\frac{\partial S}{\partial E} u.a$
	21,97756
	24,81107
	25,83973
	24,55968
	26,14273
$\frac{\partial S}{\partial E} prom$	24,66615
u.a	
sd	1,64457

Figura 12. Señal fotoacústica versus energía del pulso láser para el detector PZT de 2.5mm de longitud .

7.- Detector de 3mm de longitud

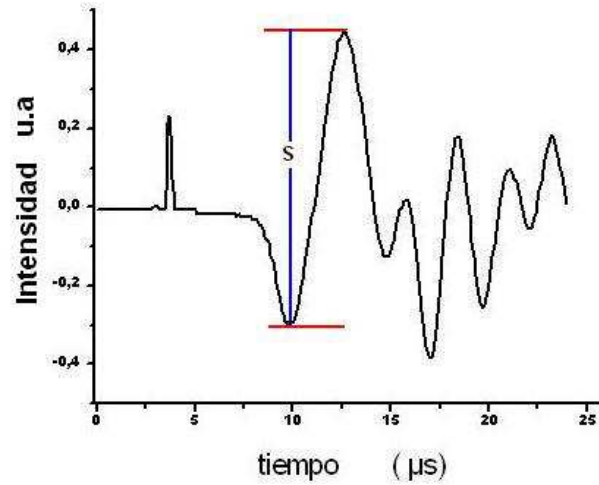
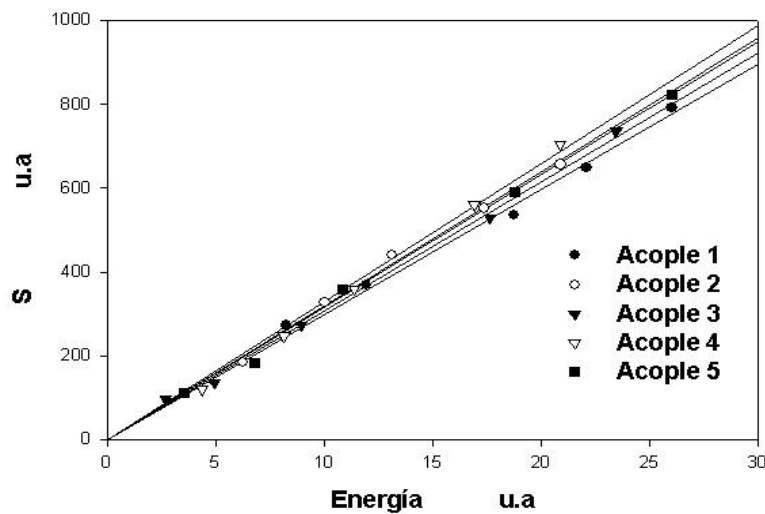


Figura 13. Señal Fotoacústica típica obtenida cuando se utiliza como detector el piezoeléctrico de longitud 3mm .



	$\frac{\partial S}{\partial E} u.a$
	29,8812
	31,9148
	30,7784
	32,8939
	31,6090
$\frac{\partial S}{\partial E} prom$ <i>u.a</i>	31,4155
sd	1,14372

Figura 14. Señal fotoacústica versus energía del pulso láser para el detector PZT de 3mm de longitud .

8.- Detector de 4mm de longitud.

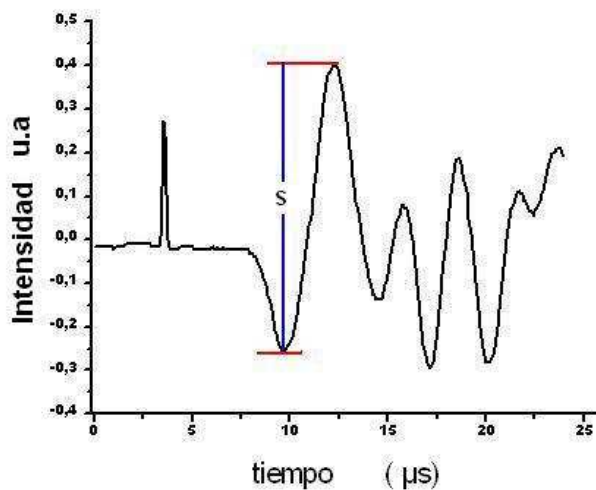
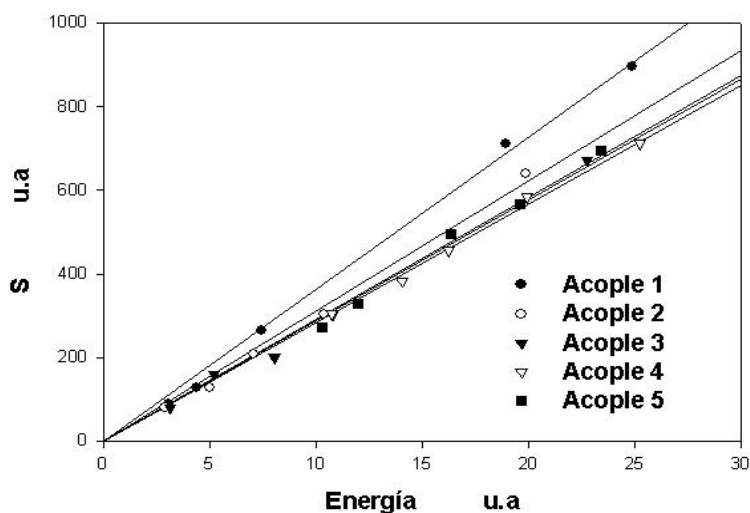


Figura 15. Señal Fotoacústica típica obtenida cuando se utiliza como detector el piezoeléctrico de longitud 4mm



	$\frac{\partial S}{\partial E} u.a$
	36,35005
	31,11788
	28,88778
	28,34624
	29,167
$\frac{\partial S}{\partial E} prom$ u.a	30,77379
sd	3,28804

Figura 16. Señal fotoacústica versus energía del pulso láser para el detector PZT de 4mm de longitud .

9.- Detector de 7mm de longitud.

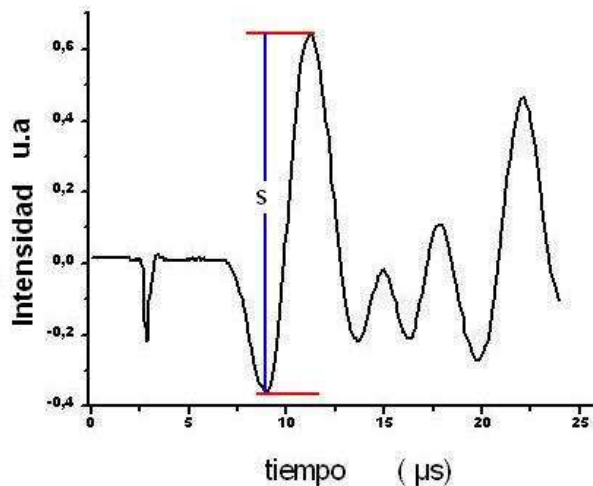
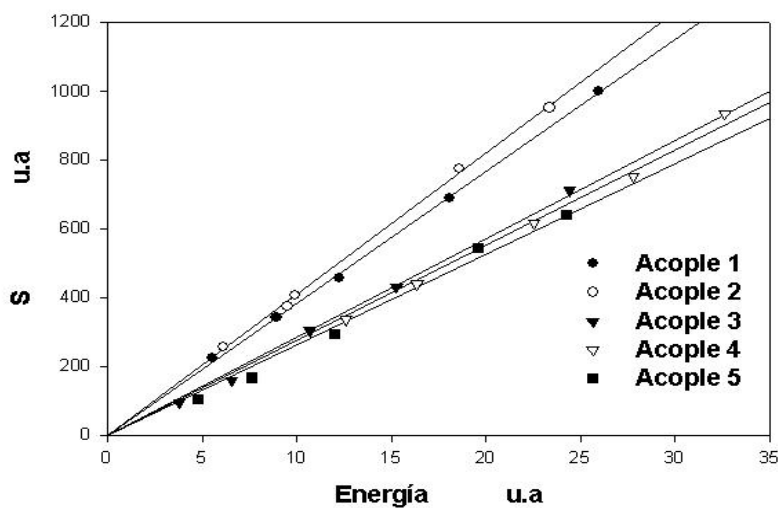


Figura 17. Señal Fotoacústica típica obtenida cuando se utiliza como detector el piezoelectrico de longitud 7mm .



	$\frac{\partial S}{\partial E} u.a$
	38,3236
	41,0306
	28,5959
	27,6966
	26,3315
$\frac{\partial S}{\partial E} prom$	32,3957
$u.a$	
sd	6,76376

Figura 18. Señal fotoacústica versus energía del pulso láser para el detector PZT de 7mm de longitud

10.- Detector de 9.8mm de longitud.

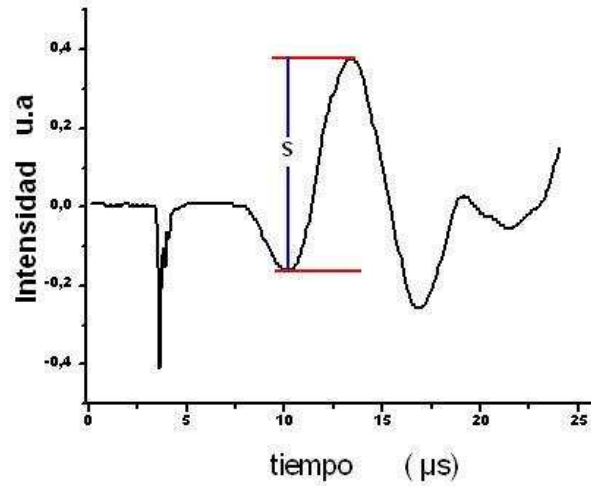
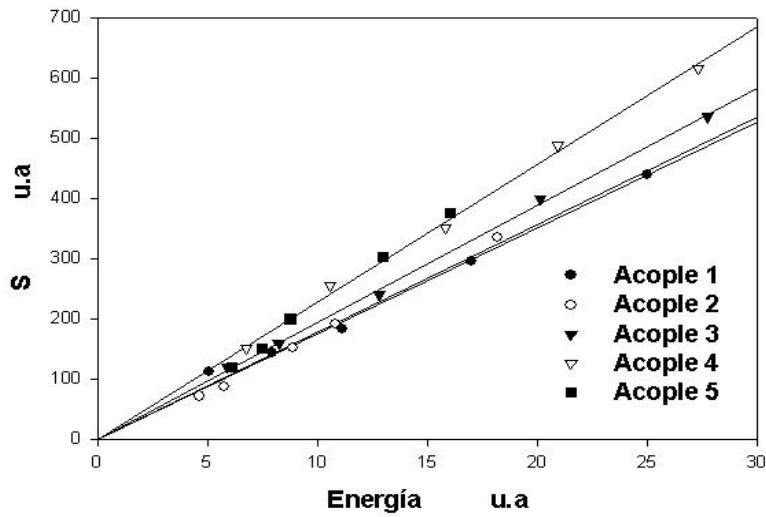


Figura 19. Señal Fotoacústica típica obtenida cuando se utiliza como detector el piezoeléctrico de longitud 9.8mm .



	$\frac{\partial S}{\partial E} u.a$
	17,57179
	17,86775
	19,44946
	22,84467
	22,84166
$\frac{\partial S}{\partial E}^{prom}$	20,11507
u.a	
sd	2,59069

Figura 20. Señal fotoacústica versus energía del pulso láser para el detector PZT de 9.8mm de longitud.

4. CONCLUSIONES

Se construyeron 11 transductores basados en cerámicos piezoeléctricos con igual diámetro y longitud variable, de 0.35mm a 9.8mm.

Los transductores piezoeléctricos implementados, generaron señales acústicas de muy buena calidad.

Los detectores se utilizaron como transductores en espectroscopía fotoacústica pulsada en fase líquida, se analizó la respuesta de cada uno, midiendo la sensibilidad del detector.

La sensibilidad se obtuvo en las gráficas de señal fotoacústica versus energía del haz láser. Se puede apreciar que la acción de acoplar y desacoplar no presentó mayor variación, pues la desviación estándar de las medidas varía entre un 3.63% y no supera el 25.46%.

Cuando la longitud del cristal piezoeléctrico crece, aumenta la sensibilidad del mismo, y alcanza su máximo de sensibilidad aproximadamente cuando el cristal es de 6mm de longitud, después la sensibilidad empieza a disminuir.

Con el montaje implementado para fotoacústica en fase líquida se observó que se puede simultáneamente medir la cantidad de energía liberada como calor y la cantidad de energía emitida en forma de luz por fluorescencia de una misma muestra.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. C Tam and C: K. N. Patel. Optical Absorptions of Ligth and Heavy Water by Laser Optoacoustic Spectroscopy. Applied Optics. Volumen 18 No 19. Pág 3348-3357.
- [2] Andrew C. Tam. Applications of Photoacoustic Sensing Techniques. Reviews of Modern Physics. Volumen 58 No 2, Pág 381-431. 1986.
- [3] ANSI/IEEE Std 176-1987 IEEE Standard on Piezoelectricity. Pág 1-66
- [4] C. K. N Patel and A. C. Tam, Pulsed Optoacoustic Spectroscopy of Condensed Matter. Reviews of Modern Physics. Volumen 53 No 3, Pág. 517-550. 1981
- [5] IRE Standards on Piezoelectric crystal. Volumen 49. Pág 1161-1169. 1961.
- [6] Peña Heriberto. Construcción y Caracterización de un sistema piezoeléctrico para espectroscopia Fotoacústica en fase condensada.
- [7] Piezoelectrically Driven Tip / Tilt Platforms, en: www.pi.ws.
- [8] R. Cabanzo, H. Peña, O. Aya. Revista Colombiana de Física. Volumen 34 No 1. Pág 177-181. 2002.
- [9] Silvia E. Braslavsky and G. E. Heibel. Time-Resoved Photothermal and Photoacoustic Methods Applied to Photoinduced Processes in Solution. Chemical Reviews. Volumen 92 No 6, Pág 1381-1410. 1992
- [10]Y. Bae, J.J Song and Y. B. Kim., Photoacoustic detection of nanosecond-pulse-induced optical absorption in solids.Applied Optics, Volumen 21., No 1, Pág 35-40. 1982.