



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN

INGENIERÍA

**“MEDIDOR DE ENERGÍA PARA LÁSERES PULSADOS EN EL
INTERVALO DE 200 A 400 nm Y FRECUENCIAS DE 1 A 20 HZ”**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

INGENIERÍA ELÉCTRICA – SISTEMAS ELECTRÓNICOS

P R E S E N T A :

OSVALDO CRUZ MONDRAGON

TUTOR:

DRA. MARGARITA NAVARRETE MONTESINOS

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

MEXICO D.F., ENERO 2013



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: **Dr. Prado Molina Jorge**

Secretario: **Dra. Mejía Uriarte Elsi Violeta**

Vocal: **Dra. Navarrete Montesinos Margarita**

1^{er}. Suplente: **Dr. Martínez López José Ismael**

2^{do}. Suplente: **Dra. Oropeza Ramos Laura**

Lugares donde se realizo la tesis: Instituto de Ingeniería UNAM y CCADET

TUTOR DE TESIS:

DRA. MARGARITA NAVARRETE MONTESINOS

FIRMA

AGRADECIMIENTOS

- En primer lugar a mi esposa, mi hija y mis padres por el apoyo incondicional que siempre me han otorgado.
- A la Dra. Margarita Navarrete Montesinos, por la revisión y dirección de esta tesis así como por los conocimientos transmitidos bajo su tutoría.
- Al Dr. Mayo Villagrán Muñiz, por facilitarme el equipo e instalaciones del laboratorio de fotofísica del CCADET.
- A la Dra. Elsi Violeta Mejía Uriarte, por su apoyo y asesorías durante mis estudios de maestría.
- A la Universidad Nacional Autónoma de México por la beca otorgada a través de la coordinación de estudios de posgrado para la realización de mis estudios de maestría.

RESUMEN

Se presenta un medidor de energía láser pulsada basado en el efecto fotoacústico, en el intervalo de 10-20 mJ y centrado en una longitud de onda de 248nm. El medidor se basa en los procesos no radiativos (emisión ultrasónica) que el pulso láser genera al ser absorbido por una mezcla cerámica con partículas de carbón y óxido de hierro que absorben en la región ultra violeta, la cual se detecta mediante un transductor piezoeléctrico centrado en 5MHz con un ancho de banda de 120MHz que se encuentra embebido en la mezcla.

La calibración a 248 nm se realizó mediante un análisis estadístico y una regresión lineal a valores experimentalmente obtenidos del área bajo la curva de señales fotoacústicas generadas por pulsos láser de energía conocida, para lo cual como referencia se utilizó un medidor que tiene integrado el propio láser. Posteriormente se desarrolló un programa en MATLAB que hace uso de la curva de calibración para cuantificar la energía promedio de pulsos láser.

ÍNDICE

Lista de figuras	vii
Lista de tablas	ix
OBJETIVO Y JUSTIFICACIÓN.....	x
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Medidores de energía láser.....	1
1.2 Detectores de energía láser.....	1
1.3 Medidores de energía láser comerciales.....	4
1.4 Medidores de energía láser experimentales.....	5
1.5 Fotoacústica como técnica de medición de potencia y energía láser.....	6
CAPÍTULO 2. CONCEPTOS BÁSICOS.....	8
2.1 Efecto fotoacústico.....	8
2.2 Sensor piezoeléctrico.....	11
2.3 Detección piezoeléctrica de señales fotoacústicas.....	13
2.4 Absorción óptica.....	14
2.5 El láser.....	15
CAPÍTULO 3. DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	19
3.1 Equipo utilizado.....	19
3.2 Preparación del detector de energía.....	21
3.3 Caracterización espectroscópica de la mezcla BaTiO ₃ -Tóner.....	24
3.4 Cuantificación de energía láser a través de señales fotoacústicas.....	25
3.4 Experimentos realizados.....	26
3.4 Energía incidente sobre el detector.....	27
3.5 Procesamiento de las señales.....	30

CAPÍTULO 4. CALIBRACIÓN Y PRUEBAS DEL SENSOR.....	38
4.1 Procedimiento de calibración.....	38
4.2 Pruebas.....	41
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	44
APÉNDICE A. Medidores de energía comerciales.....	45
APÉNDICE B. Código en MATLAB del programa de acondicionamiento y procesamiento.....	50
APÉNDICE C. Generación de señales fotoacústica.....	52
APÉNDICE D. Hoja de datos del láser de excimero.....	59
REFERENCIAS.....	62

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1.1	Sistema de medición de energía láser.	5
2.1	Procesos que se generan después de la absorción óptica	9
2.2	Proceso de generación de ondas ultrasónicas en un sólido a través de radiación láser.	10
2.3	Modelo molecular para explicar el efecto piezoeléctrico: a) molécula sin perturbar, b) molécula sujeta a una fuerza externa, y c) efecto de polarización sobre las superficies	12
2.4	Modelo de carga del sensor piezoeléctrico	13
2.5	Haz de radiación que atraviesa una muestra macroscópica de materia	14
2.6	Proceso de emisión estimulada para un sistema de dos niveles de energía E_2 y E_1	16
2.7	Esquema simplificado de un láser, que consiste de un medio activo	17
3.1	Láser excímero de KrF, emite en una longitud de onda de 248 nm y proporciona pulsos de hasta 100mJ con ancho temporal de 10-50 ns	20
3.2	a) Sensor piezoeléctrico comercial olympus panametrics V310, b) constitución interna del sensor piezoeléctrico V310.	21
3.3	a) caja de petri fijada al sensor piezoeléctrico, b) vista lateral, c) vista lateral con dimensiones	22
3.4	a) Imagen del detector de energía fotoacústico sobre la mesa óptica donde se fija para depositar la mezcla de cerámica-tóner, b) toma superior del sensor sobre la mesa óptica.	23
3.5	a) Espectro de absorción de la mezcla: BaTiO ₃ -Tóner.	24
3.6	Esquemático del arreglo experimental, los pulsos del láser inciden de forma directa sobre el detector fotoacústico y el fotodiodo se utiliza para proporcionar la señal de disparo del osciloscopio	27
3.7	Montaje experimental, en esta imagen se observan los dispositivos utilizados: detector de energía fotoacústico, láser, osciloscopio, diafragma; la imagen fue tomada en el laboratorio de fotofísica del CCADET, lugar donde se realizaron las pruebas	28
3.8	Programa de acondicionamiento y procesamiento de las señales del detector de energía, desarrollado en MATLAB.	30
3.9	a) Señal no recortada en el eje X (tiempo), b) Señal solo con valores positivos en el tiempo	31
3.10	a) Señal no ajustada a cero en el eje Y (amplitud), b) Señal ajustada a cero (eliminación del offset) en el eje Y	32
3.11	Señales fotoacústica generadas para diez valores diferentes de energía láser, aquí se observa el incremento de la amplitud conforme se incrementa la energía	33
3.12	Hoja de trabajo en origen de los valores generados por el programa desarrollado en MATLAB	34

3.13	Gráficas de Energía Vs Área del experimento 1 y 2.	35
3.14	Gráficas de Energía Vs Área del experimento 3 y 4.	36
3.15	Gráfica de Energía Vs Área del experimento 5.	37
4.1	Datos de los cinco experimentos realizados	38
4.2	Grafica del promedio de los cinco experimentos realizados	39
4.3	Curva de calibración (ajuste lineal), Energía Vs Área bajo la curva. De esta grafica se obtiene el valor de la energía láser en función del área bajo la curva de la señal fotoacústica	40
4.4	Gráfica de los valores y mediciones de prueba	42

LISTA DE TABLAS

Tablas		Página
1.1	Materiales semiconductores comunes.	2
1.2	Materiales utilizados en la construcción de termopilas	3
1.3	Materiales piroeléctricos comunes	3
1.4	Elección de detectores de acuerdo a la fuente y variable a cuantificar	4
1.5	Intervalos de operación de los tres tipos de detectores	4
1.6	Medidores de energía a nivel experimental	6
1.7	Medidores de potencia y energía láser mediante efecto fotoacústico clásico con celda.	7
2.1	Materiales piezoeléctricos	14
3.1	Comparación de valores reales de energía de salida y valores fijados con el control electrónico	29
3.2	Valores de energía que pasan a través del diafragma	29
4.1	Tabla de valores de energía que pasan a través del diafragma, de acuerdo al medidor de calibración y el medidor de energía fotoacústico	43

OBJETIVO GENERAL

Diseñar e implementar un medidor de energía robusto para láseres pulsados en el intervalo de 200 a 400 nm y frecuencias de 1 a 20 Hz.

JUSTIFICACIÓN

La medición de energía que emite un láser en la región ultravioleta (UV) es un proceso problemático ya que los fotones en esta región tienen energías que van desde 3 eV hasta 12.4 eV que provocan que la mayoría de los materiales que se emplean en los detectores comerciales se degraden rápidamente y terminen dañados. En este trabajo se propone un material cerámico que presenta una gran dureza y tiene un punto de fusión mayor a 1500 °C, se propone Titanato de Bario (BaTiO_3) mezclado con de partículas de Carbón y Hierro como material para absorber el pulso ultravioleta y detectar su señal fotoacústica para determinar la energía promedio de los pulsos láser.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se abordan las características de los medidores de energía láser comerciales y en desarrollo, se explican brevemente los tipos de detectores con los que operan. Asimismo, se mencionan algunos trabajos realizados en esta área a nivel experimental y se aborda la medición de energía láser a través del efecto fotoacústico.

1.1 MEDIDORES DE ENERGÍA LÁSER

En la actualidad, para cuantificar la energía que proporcionan los láseres, se han desarrollado dispositivos capaces de realizarlo en tiempo real [1]. Estos medidores de energía se usan principalmente en aplicaciones de laboratorio donde es indispensable monitorear constantemente la energía del láser; por ejemplo, cuando la energía láser se emplea como parámetro de entrada en algún experimento. Actualmente, se usan tres tipos de detectores: piroeléctricos, fotodiodos y termopilas [2]. Su uso depende de la longitud de onda y de la energía del haz o pulso; además, el desempeño de cada uno está sujeto a su principio de operación, geometría y a las propiedades de los materiales con los que esté fabricado [3].

1.2 DETECTORES DE ENERGÍA LÁSER

Como ya se mencionó, para cuantificar la energía que proporciona un láser se utilizan los siguientes detectores:

- 1) Fotodiodos
- 2) Termopilas
- 3) Piroeléctricos

A continuación se describen sus características principales:

1) FOTODIODOS: son dispositivos compuestos por la unión de dos capas semiconductoras con dopajes p y n, capaces de detectar energía óptica a través de

procesos electrónicos. La absorción de fotones por la unión semiconductor p-n genera portadores de carga que posteriormente son recolectados por un circuito eléctrico externo. El ancho de la banda prohibida $E_g = h\nu$ determina la máxima longitud de onda detectable $\lambda_{max} = hc/E_g$; así, para valores mayores a esta longitud de onda, el material es ópticamente transparente y no hay absorción de fotones ni generación de pares electrón-hueco. Varios materiales semiconductores ofrecen respuesta a diferentes intervalos de longitud de onda (ver TABLA 1).

TABLA 1.1 *Materiales semiconductores comunes.*

MATERIAL	ENERGÍA DE BANDA PROHIBIDA (eV)	λ (μm)
GaN	3.5	0.35
SiC	3.0	0.41
GaP	2.24	0.55
GaAs	1.43	0.87
InP	1.29	0.96
Si	1.1	1.11
InxGa1-xAs	0.48–0.73	1.70–2.60
GaSb	0.67	1.85
Ge	0.66	1.88
PbS	0.41	3.02
PbTe	0.32	3.88

Los fotodiodos son utilizados para mediciones de baja potencia debido a su alta sensibilidad, bajo ruido y tiempo de respuesta rápido; por su tecnología de fabricación son de dimensiones compactas, lo que permite emplearlos en espacios reducidos. Una desventaja de los fotodiodos es que su respuesta no siempre es uniforme sobre toda el área activa, lo que ocasiona una reducción en la capacidad de repetición de las mediciones cuando el haz no es uniforme o cuando la posición sobre el detector varía entre mediciones [2].

2) TERMOPILAS: son detectores en donde la energía láser absorbida se transforma en calor. Esta energía térmica fluye hacia un disipador, que se mantiene a temperatura ambiente constante mediante un sistema de refrigeración. La diferencia de temperatura entre el material absorbente y el disipador es detectado por un arreglo de termopares o

uniones semiconductoras (de ahí el nombre de termopilas), generando así una señal eléctrica proporcional al gradiente de temperatura. Las termopilas cuantifican la salida total del láser sin tomar en cuenta la distribución espacial, lo que los hace inmunes a cambios en el tamaño, posición y uniformidad del haz. Son de respuesta lenta, por lo que su uso se limita a medir energía láser promedio. Son, también, de baja sensibilidad; por un lado, esto los hace más exactos, pero a la vez los hace inadecuados para medir láseres de baja potencia [2]. En la TABLA 2 se enlistan los materiales utilizados en la construcción de termopilas.

TABLA 1.2 *Materiales utilizados en la construcción de termopilas.*

MATERIAL	TIPO
Fe/Cu-Ni	J
Ni-Cr/Ni-Al	K
Pt-13%Rh/Pt	R
Pt-10%Rh/Pt	S
Cu/Cu-Ni	T

3) PIROELÉCTRICOS: los materiales piroeléctricos son cristales ferroeléctricos que poseen un momento dipolar permanente. La energía óptica absorbida calienta al cristal, lo que ocasiona un cambio en su momento dipolar, generando una carga eléctrica. Esta generación de carga sólo se presenta cuando varía el momento dipolar y no cuando se alcanza una condición de estabilidad. Esta característica los hace útiles en mediciones de láseres pulsados [3]. En la TABLA 3 se enlistan los materiales piroeléctricos más comunes.

TABLA 1.3 *Materiales piroeléctricos comunes.*

TIPO	MATERIAL
Monocrystal	Sulfato de Triglicina (TGS)
	Sulfato de Triglicina Deuterado (DTGS)
	Tantalato de Litio (LiTaO_3)
	Niobato de Litio (LiNbO_3)
Cerámico	Titanato Zirconato de Plomo (PZT)
	Titanato de Bario Estroncio (BST)
	Tantalato de Escandio Plomo (PST)
Polímero	Polifluoruro de Vinilideno (PVDF)

En resumen, las termopilas necesitan un tiempo relativamente largo para llegar al equilibrio térmico después de cada pulso láser, lo que las limita a mediciones de láseres continuos. Los fotodiodos tienen un tiempo de respuesta rápido, pero el intervalo de longitudes que detectan es reducido. Por último, los piroeléctricos tienen un intervalo amplio de respuesta espectral, alta tasa de repetición y alta sensibilidad, lo que los hace adecuados para láseres pulsados. En la TABLA 4 se clasifican los detectores de acuerdo a su aplicación, y en la TABLA 5 se muestran sus intervalos de operación.

TABLA 1.4 Elección de detectores de acuerdo a la fuente y variable a cuantificar.

TIPO DE LÁSER	CANTIDAD A CUANTIFICAR	TIPO DE SENSOR ADECUADO
Continuo	Potencia promedio	Fotodiodo Termopila
	Potencia promedio	Termopila Piroeléctrico
Pulsado	Energía por pulso	Piroeléctrico
	Pulso integrado	Termopila

TABLA 1.5 Intervalos de operación los tres tipos de detectores.

DETECTOR	INTERVALO DE LONGITUDES DE ONDA (nm)	INTERVALO DE ENERGÍAS O POTENCIA
Fotodiodo	Si [190-1100]	20pJ-200mJ
	Ge [780-1800]	
	AsGaIn[800-1650]	
Piroeléctrico	[100-1000]	2nJ-250J
Termopilas	[250nm-1100]	mW a KW

1.3 MEDIDORES DE ENERGÍA LÁSER COMERCIALES

Los medidores de energía láser comerciales son el conjunto detector-consola, esta última contiene la electrónica para adquirir, acondicionar y procesar la señal del detector. Independientemente del fabricante, tienen características comunes, por ejemplo: puertos para comunicación externa (GPIB, RS-232, USB), interfaz gráfica para desplegar lecturas de las mediciones, controles para interactuar con ella y software que permite manipular la señal después de haber sido digitalizada. Una ventaja de las consolas actuales, es que son capaces de trabajar con los tres tipos de detectores descritos anteriormente, lo que hace flexible la integración de un sistema de medición de energía láser. En el APÉNDICE A se enlistan detectores y consolas actuales.



FIG. 1.1 *Sistema de medición de energía láser.* Fuente: coherent.com

1.4 MEDIDORES DE ENERGÍA LÁSER EXPERIMENTALES

Basados en los tres tipos de detectores mencionados, se han implementado medidores de energía a nivel experimental. Se han reportado tanto para láseres pulsados como continuos y distintos intervalos de energía, en la TABLA 6 se enlistan algunos de estos trabajos.

TABLA 1.6 *Medidores de energía a nivel experimental.*

TIPO DE DETECCIÓN	INTERVALO DE ENERGÍA O POTENCIA QUE MIDEN	TIPO DE LÁSER	REFERENCIA
Piroeléctrico	[4-14]mJ	Nd:YAG pulsado a 532nm	[7]
Piroeléctrico	200μW-3W	Nd:YAG pulsado a 1064 nm	[8]
Fotodiodo	1pW-10mW	Nd:YAG pulsado a 532nm	[9]
Piroeléctrico	30μW-100mW	Laser FIR	[10]
Piroeléctrico	[6-130]mJ	Nd:YAG pulsado a 1064 nm	[11]
Fotodiodo	10mJ-10J		[12]

1.5 FOTOACÚSTICA COMO TÉCNICA DE MEDICIÓN DE POTENCIA Y ENERGÍA LÁSER

Además de los medidores de potencia y energía láser que ya se han explicado, se han implementado medidores de energía basados en el efecto fotoacústico clásico. El trabajo de Satheeshkumar y Vallabhan [14] es pionero en la medición de energía y potencia láser utilizando este principio. Ellos emplearon una celda cerrada, la detección de la señal fotoacústica la realizaron a través de un micrófono y calcularon las amplitudes de la señal basados en la teoría de Rosencwaig y Gerso [4]. Otro trabajo de importancia es el de Peralta, Al-Khafaji y Williams [16], de igual manera diseñaron un medidor de potencia láser basado en el efecto fotoacústico, pero la detección de la señal fue a través de un transductor piezoeléctrico; en su trabajo hicieron uso de la teoría desarrollada por Jackson y Amer [5]. Duarte y Vieira [18] realizaron un medidor de potencia para un láser

de argón que emitía en una longitud de onda de 514.5 nm a una frecuencia de obturación de 40Hz. Como material absorbente utilizaron filtros de densidad neutra de silica con recubrimiento metálico. Para la generación fotoacústica fabricaron una celda de acero inoxidable con un volumen de 60 mm³, donde la ventana de la celda era el propio filtro. El dispositivo detector fue un micrófono *electret* con sensibilidad 1V/ μ bar y el intervalo de potencia que lograron medir fue de [0.3-15] W. En la TABLA 7 se enlistan algunos medidores basados en este principio.

TABLA 1.7 *Medidores de potencia y energía láser mediante efecto fotoacústico clásico con celda.*

TIPO DE DETECCIÓN	INTERVALO DE ENERGÍA O POTENCIA QUE MIDEN	TIPO DE LÁSER	REFERENCIA
Micrófono	[5-45]mJ	Nd:YAG pulsado a 532nm	[13]
Micrófono	5uW-10W	Argon, continuo a 514nm	[14]
Micrófono	Hasta 1W	Argon, continuo a 514nm	[15]
Piezoeléctrica	Hasta 1W	Argón continuo	[16]
Piezoeléctrica	[5-150]mJ	Nd:YAG pulsado	[17]
Micrófono	[0.3-15]W	Argón continuo a 514.5nm	[18]
Micrófono		He-Ne 632.8nm	[19]

CAPÍTULO 2. CONCEPTOS BÁSICOS

En éste capítulo se definen los conceptos básicos empleados para el desarrollo del trabajo: efecto fotoacústico (clasificación y detección), sensor piezoeléctrico y absorción óptica. Por último, se brinda una breve explicación de cómo funciona un láser.

2.1 EFECTO FOTOACÚSTICO

El efecto fotoacústico se refiere a la generación de ondas acústicas en un medio después de la interacción con radiación electromagnética pulsada o modulada. Este efecto fue descubierto en el siglo XIX por el científico escocés Alexander Graham Bell, quien observó que al hacer incidir de forma periódica los rayos del sol sobre un material se generaba sonido. En la actualidad, se conoce que no sólo la luz produce este efecto, también lo produce cualquier radiación electromagnética, entre ellas: haz de protones, electrones, y otras partículas [20].

Las señales fotoacústicas (FA) se generan enseguida del proceso de absorción óptica. Son el resultado de procesos de desexcitación no radiativos, denominados efectos fototérmicos, los cuales provocan incrementos de presión y temperatura sobre el material. Distintos procesos además de los fototérmicos se llegan a presentar después de la absorción óptica, estos se muestran en la FIGURA 2.1.

Para clasificar la generación de señales fotoacústicas se toma en cuenta:

1. Tipo de acoplamiento:
 - Directo: la onda acústica se produce en la muestra; es decir sobre el material que absorbe directamente la radiación electromagnética.
 - Indirecto: la señal se genera en un medio adyacente acoplado a la muestra, generalmente es un gas o un líquido.

2. Modo de excitación:

- Onda continua modulada: en este modo el haz continuo de un láser o una lámpara, se interrumpe con un obturador, el cual permite o no el paso del haz a frecuencias del orden de KHz.
- Pulsado: en este modo se utilizan láseres pulsados capaces de emitir pulsos con un ancho temporal del orden de ns y fs.

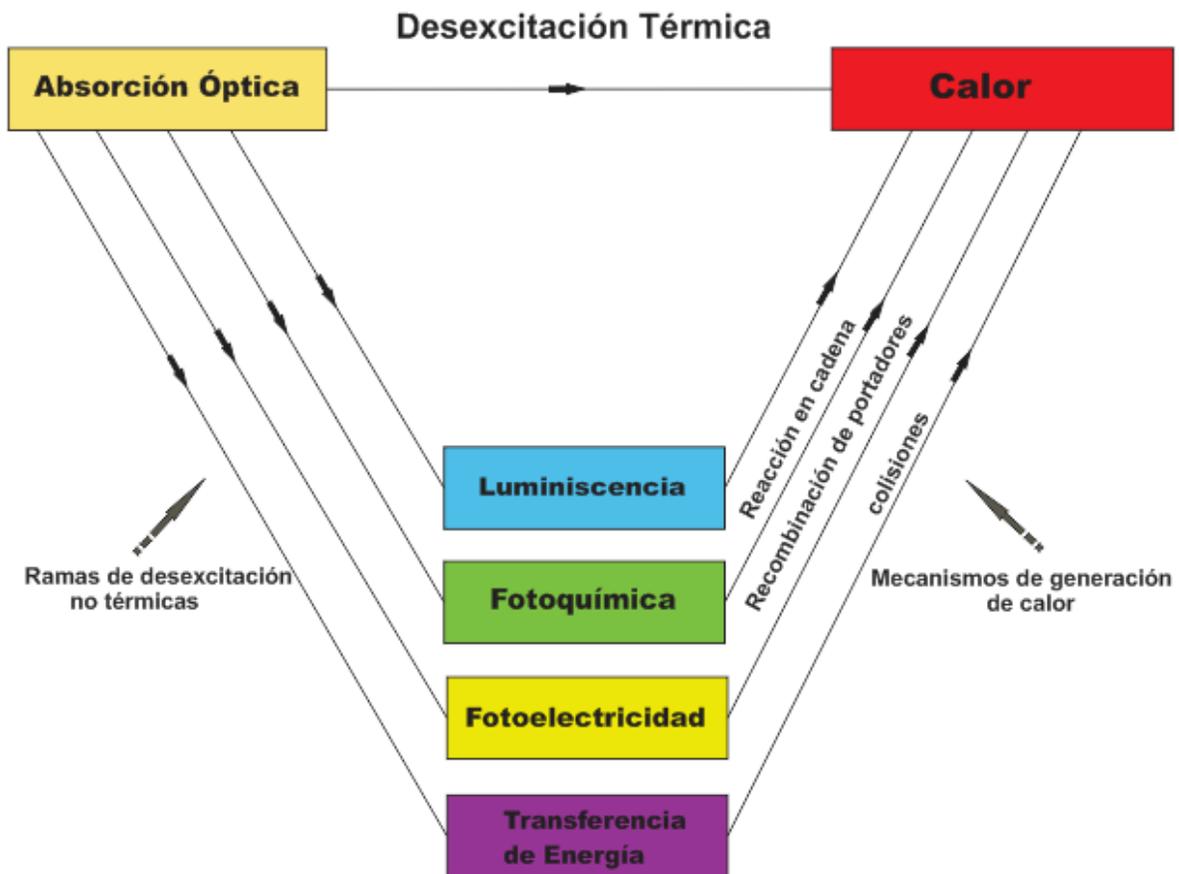


FIGURA 2.1 Procesos que se generan después de la absorción óptica.

La generación de ondas acústicas a través de láseres, fue demostrada por White [21], desde entonces los láseres han sido utilizados para generación de ultrasonido en sólidos,

líquidos y gases. El proceso de generación ultrasónica con láseres sobre un sólido (FIGURA 2.2), es el siguiente: la radiación electromagnética incidente es parcialmente absorbida en la superficie del material, la energía absorbida se transforma en calor ocasionando un incremento rápido en la temperatura de la región irradiada, esto da como resultado una expansión térmica rápida, la cual conduce a la generación de ondas ultrasónicas dentro del medio [22]. Si la energía láser no es lo suficientemente grande para ablacionar o fundir el material se dice que la generación ultrasónica se encuentra en el régimen termoelástico y si sucede lo antes mencionado se dice que se encuentra en el régimen ablativo, en donde la generación principalmente se debe a la transferencia de momento debido a la expulsión de material.

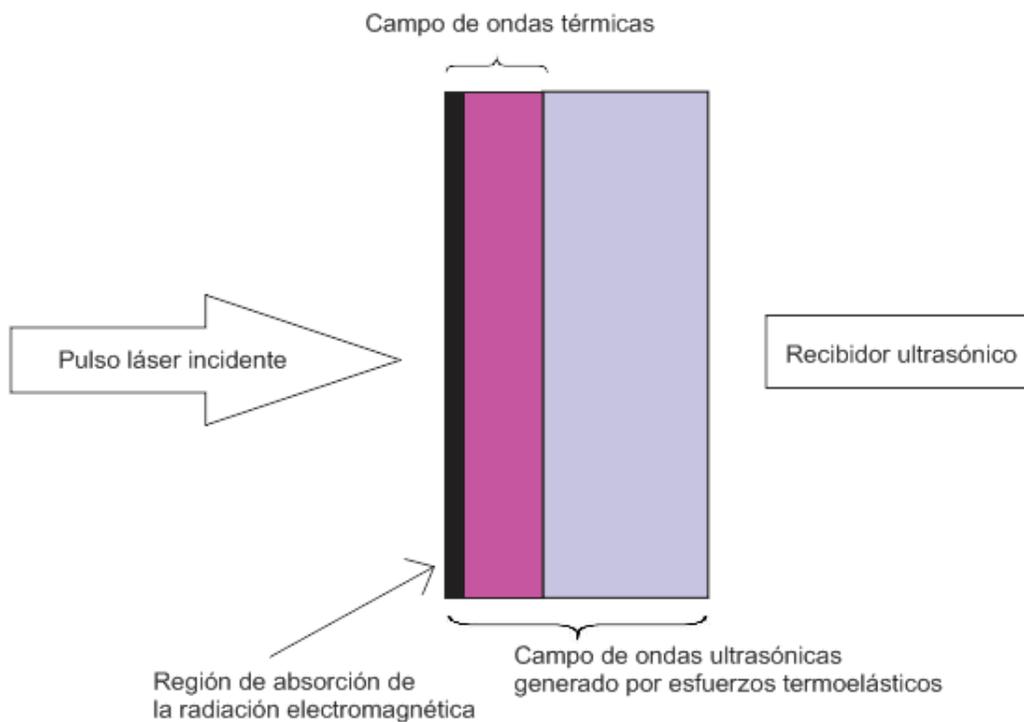


FIGURA 2.2 *Proceso de generación de ondas ultrasónicas en un sólido a través de radiación láser. La radiación electromagnética del láser es absorbida en la superficie de la muestra, provocando un calentamiento. La energía térmica enseguida se propaga sobre la muestra como ondas térmicas. La región calentada experimenta una expansión térmica y esfuerzos termoelásticos generan ondas elásticas (ultrasonido) que se propagan dentro del material.*

Para el régimen termoelástico sobre materiales sólidos, donde la energía óptica se absorbe sobre una capa delgada de la superficie, Scruby [23], propuso que el mecanismo de generación ultrasónica eran fuerzas cortantes que actúan sobre la superficie del material. Su argumento está basado en la consideración de que una fuente de expansión puntual se genera en el interior del material. A este enfoque se le dio una base rigurosa en el modelo propuesto por Rose [24] y lo nombro centro de expansión superficial (SCOE). Modelos termoelásticos mas completos fueron posteriormente desarrollados por McDonald [25] y Spicer [26].

2.2 SENSOR PIEZOELÉCTRICO

El término piezoeléctrico fue propuesto por Hankel en 1881 para nombrar el fenómeno descubierto un año antes por Pierre y Jacques Curie. Ellos observaron que cargas positivas y negativas se generaban sobre la superficie de un cristal cuando era comprimido en varias direcciones. Un modelo molecular se observa en la FIGURA 2.3a; ésta explica la generación de cargas eléctricas como resultado de un esfuerzo aplicado sobre el material. Antes de someter éste material a un esfuerzo externo, los centros de gravedad de las cargas negativas y positivas de cada molécula coinciden. Por tanto, los efectos externos de las cargas positivas y negativas son recíprocamente cancelados y como resultado se obtiene una molécula eléctricamente neutra. Cuando se ejerce una fuerza sobre el material, su estructura interna se deforma, ocasionando la separación de los centros de gravedad de las cargas positivas y negativas, lo que genera dipolos eléctricos (FIGURA 2.3b). Estos se cancelan internamente, sin embargo, una distribución de carga aparece en las superficies del material (FIGURA 2.3c), por tanto, esta polarización genera un campo eléctrico [27].

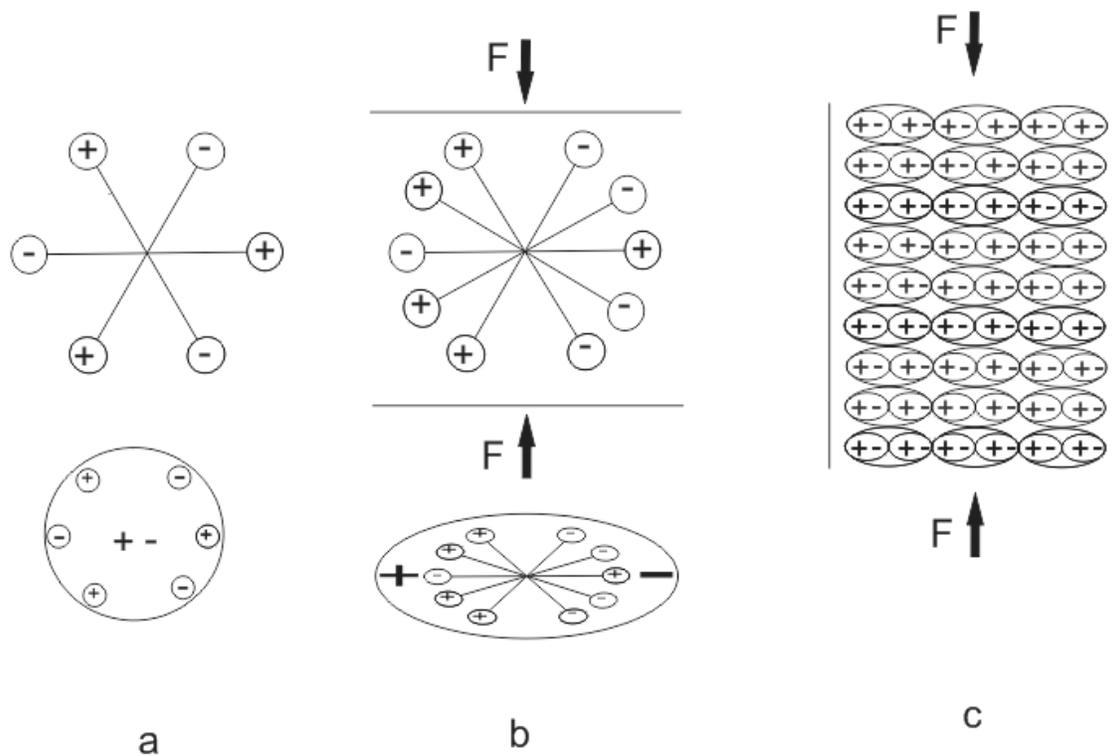


FIGURA 2.3 Modelo molecular para explicar el efecto piezoeléctrico: a) molécula sin perturbar, b) molécula sujeta a una fuerza externa, y c) efecto de polarización sobre las superficies.

Los sensores piezoeléctricos no son adecuados para aplicaciones estáticas, ya que la carga que se genera decae con el tiempo debido a la impedancia interna del sensor y a la impedancia de entrada de los circuitos de acondicionamiento. Un modelo simple para el sensor piezoeléctrico es una fuente de carga en paralelo con un capacitor y una resistencia [28] (FIGURA 2.4). La carga generada q_p depende de la constante piezoeléctrica del sensor; la capacitancia C_p está determinada por el área, el espesor y la constante dieléctrica del material; por último, la resistencia R_p representa la disipación de carga estática.

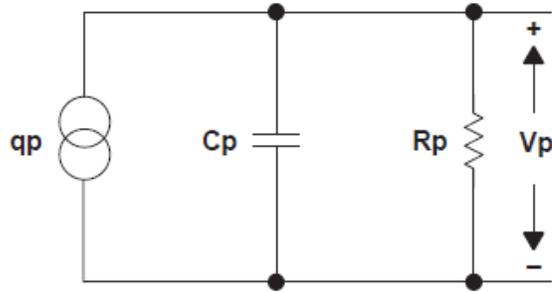


FIGURA 2.4 Modelo de carga del sensor piezoeléctrico.

2.3 DETECCIÓN PIEZOELÉCTRICA DE SEÑALES FOTOACÚSTICAS

Algunos materiales piezoeléctricos alcanzan anchos de banda de GHz, tiempos de respuestas del orden de ns, además de que poseen un acoplamiento de impedancia mayor que los micrófonos cuando se trabaja con muestras sólidas [20].

En acoplamiento directo, la señal fotoacústica está relacionada con la expansión térmica ΔV_{th} del volumen irradiado V_o , que para el caso isótropo [29] es:

$$\Delta V_{th} = \frac{\beta}{C_p \rho} H \quad (2.1)$$

Donde β es el coeficiente de expansión volumétrica, C_p es el calor específico a presión constante, ρ la densidad y H el calor depositado en el volumen V_o . Esta expansión genera una onda de presión [20]. Ya que, la señal eléctrica producida por el transductor es proporcional a la presión ejercida sobre él, se tiene que la señal fotoacústica es [29]:

$$FA = K \frac{\beta}{C_p \rho} (1 - 10^A) E_o \quad (2.2)$$

Donde A es la absorbancia óptica de la muestra, E_0 es la energía del pulso láser y K una constante que incluye las propiedades de respuesta del transductor.

En la TABLA 2.1 se enlistan los materiales piezoeléctricos utilizados comúnmente:

TABLA 2.1 *Materiales piezoeléctricos.*

Estructura	Material	
Monocristal	LiNbO ₃	
	LiTaO ₃	
	Pb(Zn _{1/3} Nb _{2/3})O ₃	
	Pb(Mg _{1/3} Nb _{2/3})O ₃	
Polímeros	PVDF	
	VDF-TrFE	
Cerámicos	Perovskite	BaTiO ₃
		PbTiO ₃
		PbZr _x Ti _{1-x} O ₃
		PLZT
		PMN

2.4 ABSORCIÓN ÓPTICA

La magnitud que cuantifica la cantidad de radiación que absorbe un medio es el coeficiente de absorción.

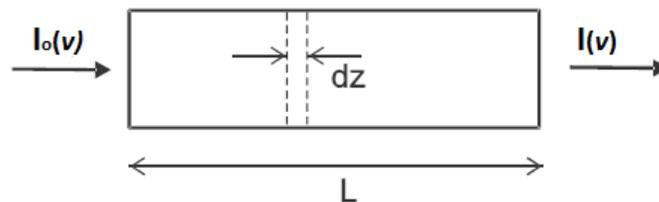


FIGURA 2.5 *Haz de radiación que atraviesa una muestra macroscópica de materia.*

Si suponemos que un haz de radiación incide sobre un material, como se muestra en la FIGURA 2.5, la intensidad de la radiación disminuye al pasar a través del material. Experimentalmente, se ha demostrado que esta atenuación obedece a la siguiente expresión [30]:

$$\frac{dI(\nu)}{dz} = -\alpha(\nu)I(\nu) \quad (2.3)$$

Donde I es la intensidad del haz de radiación a una distancia z dentro del medio, y α el coeficiente de absorción que representa la cantidad de reducción de la intensidad debido a la constitución del material. Si se desprecian efectos de dispersión de la luz, la solución de la ecuación anterior conduce a la siguiente expresión:

$$I(v) = I_o(v)e^{-\alpha(v)l} \quad (2.4)$$

Donde $I_o(v)$ es la intensidad de la radiación incidente y l es la longitud de la muestra. Esta expresión muestra que la atenuación de la intensidad del haz conforme atraviesa el material es exponencial. A partir de la expresión 2.4 se definen otras propiedades, como son la transmitancia, que se expresa como:

$$T = \frac{I}{I_o} \quad (2.5)$$

Y la absorbancia, que es:

$$A = -\log T \quad (2.6)$$

2.5 EL LÁSER

El láser es un oscilador óptico que amplifica luz a través de emisión estimulada de radiación. Tres procesos básicos se llevan a cabo cuando la luz interactúa con la materia: absorción, emisión espontánea y emisión estimulada, siendo este último el proceso clave para la generación de luz láser [31]:

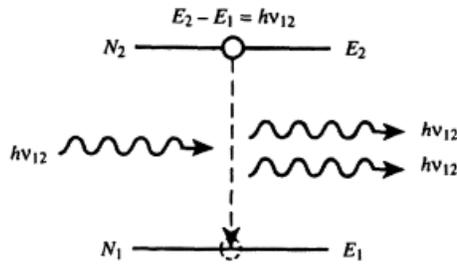


FIGURA 2.6 Proceso de emisión estimulada para un sistema de dos niveles de energía E_2 y E_1 .

La emisión estimulada es el proceso por el cual los electrones de un átomo, que se encuentren en estados excitados, son inducidos por otro fotón a regresar a su estado fundamental. Esta transición inducida genera otro fotón con la misma energía que la del fotón incidente.

Propiedades de la radiación láser

1. **DIRECCIONALIDAD:** las ondas electromagnéticas que conforman la radiación láser tienen un frente de onda plano prácticamente ideal ya que todas tienen la misma frecuencia y la misma fase. El haz emergente se desplaza, por tanto, en línea recta en la dirección del eje longitudinal de la cavidad y la única desviación que sufre se debe a los efectos de difracción provocados por la apertura de salida.
2. **MONOCROMATICIDAD:** es dada por el ancho de banda $\Delta\nu$ de la radiación. Cuanto más pequeña es $\Delta\nu$, menos componentes de frecuencia tiene la radiación y mayor es su monocromaticidad. Esta propiedad es consecuencia de la cavidad resonante, donde sólo las componentes que satisfacen la condición de que el campo eléctrico se anule en los extremos de los espejos, son las que interfieren constructivamente.
3. **COHERENCIA:** está relacionada directamente con la monocromaticidad. Si el haz tiene un ancho de banda $\Delta\nu$, las ondas que lo conforman terminan desfasándose unas con otras y pierden, por tanto, la coherencia. El tiempo que tarda en producirse el desfase es inversamente proporcional al ancho de banda, ya que cuanto mayor es éste, mayor es el número de frecuencias que contienen el haz y

más fácil es que se produzca el desfase. Este tiempo se denomina tiempo de coherencia y se define de la siguiente manera $\tau_c = 1/\Delta\nu$.

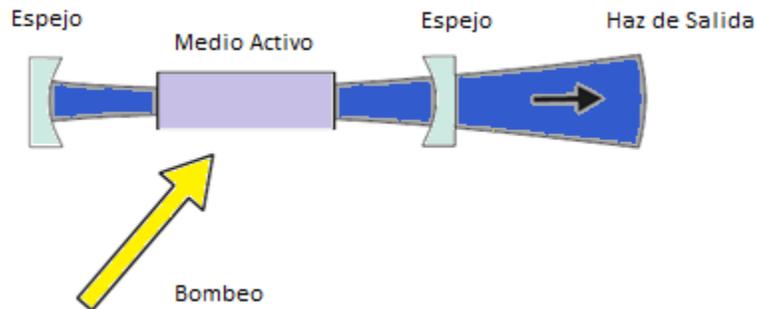


FIGURA 2.7 Esquema simplificado de un láser.

Las partes fundamentales de un láser se observan en la FIGURA 2.7 y se describen a continuación:

Medio activo

Es la materia física (átomos, moléculas o iones) donde se lleva a cabo la generación y amplificación de la radiación; puede ser sólido, líquido o gaseoso. Suponiendo un medio activo de dos niveles E_n y E_m con $E_m > E_n$, sobre el cual incide una radiación espectral de intensidad $I_o(\nu)$, cuyas poblaciones por unidad de volumen en cada nivel son n_n y n_m , si hacemos el balance de las intensidades espectrales absorbida y emitida de forma estimulada, se obtiene que la intensidad neta resultante varía a lo largo del camino recorrido por el haz, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\frac{dI(\nu)}{dz} = -[b_{nm}(\nu)n_n - b_{mn}(\nu)n_m] \frac{h\nu}{c} I(\nu) \quad (2.7)$$

Donde $b_{nm}(\nu)$ y $b_{mn}(\nu)$ son los coeficientes de Einstein de absorción y de emisión estimulada, respectivamente. De forma compacta esta última ecuación se expresa de la siguiente manera:

$$\frac{dI(\nu)}{dz} = \alpha_g(\nu)I(\nu) \quad (2.8)$$

Donde $\alpha_g(\nu)$ es el coeficiente de ganancia.

De acuerdo con esta expresión, la intensidad de la radiación que atraviesa el medio activo, aumenta o disminuye dependiendo del signo del coeficiente de ganancia.

Sistema de bombeo

Es el sistema que proporciona la energía necesaria para excitar a niveles energéticos mayores los átomos, moléculas o iones del medio activo. Existen diferentes mecanismos de bombeo, entre ellos el óptico y el eléctrico. De acuerdo con la ecuación 2.8, si las poblaciones de los niveles de energía n_n y n_m se encuentran en equilibrio térmico, el coeficiente de ganancia será menor que cero $\alpha_g(\nu) < 0$, y el haz se atenúa al atravesar el medio activo. Para que exista amplificación en lugar de absorción, el coeficiente de ganancia debe ser positivo. Esto ocurre cuando la población del nivel de energía superior m es mayor que la del nivel de energía inferior n . Por lo tanto, es necesario un sistema que proporcione la energía necesaria para que ocurra la inversión de población.

Cavidad resonante

Ésta lleva acabo la retroalimentación óptica y consta de un par de espejos colocados en los extremos del medio activo y puede estar conformada por espejos planos, cóncavos, convexos o una combinación de ellos; la cavidad hace que los fotones emitidos sean reflejados múltiples veces y pasen de nuevo a través del medio activo para generar más emisión estimulada, uno de los espejos debe de tener reflectividad casi del 100% y el otro reflectividad parcial para permitir que la energía láser salga de la cavidad.

CAPÍTULO 3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

En este capítulo se describe el material utilizado en los experimentos, se muestran las señales adquiridas, así como el procedimiento y herramientas utilizadas para su procesamiento.

3.1 EQUIPO UTILIZADO

En el arreglo experimental se utiliza un láser pulsado, un detector de energía fotoacústico, un fotodiodo y un osciloscopio, éstos se describen a continuación.

a) Láser Excímero

Una de las características más importantes de estos láseres es que son capaces de generar pulsos de alta energía en la región UV del espectro electromagnético. Como sabemos, los fotones UV contienen mayor energía que los fotones del espectro visible o infrarrojo, esto los hace útiles en aplicaciones como la investigación, la medicina y el procesamiento de materiales, por mencionar algunas. El láser utilizado (FIGURA 3.1) contiene una mezcla de Fluoruro de Kriptón (KrF), como medio activo, emite en una longitud de onda de 248nm y proporciona pulsos de hasta 100 mJ con una anchura temporal de 10-50 ns.

b) Detector de energía

El detector de energía, es la unión de un sensor piezoeléctrico centrado en 5 MHz con un ancho de banda de 120 MHz (ver Figura 3.2) y una pastilla circular sólida, compuesta por Titanato de Bario (BaTiO_3) y tóner para impresión láser, el cual está constituido por partículas de hierro, carbon y resinas termoplásticas. El BaTiO_3 es un material cerámico y se utiliza como material de soporte o matriz, las partículas de tóner se agregan para impurificarlo y que absorba la radiación UV emitida por el láser; el procedimiento de realización de la pastilla se detalla en el apartado 3.2.

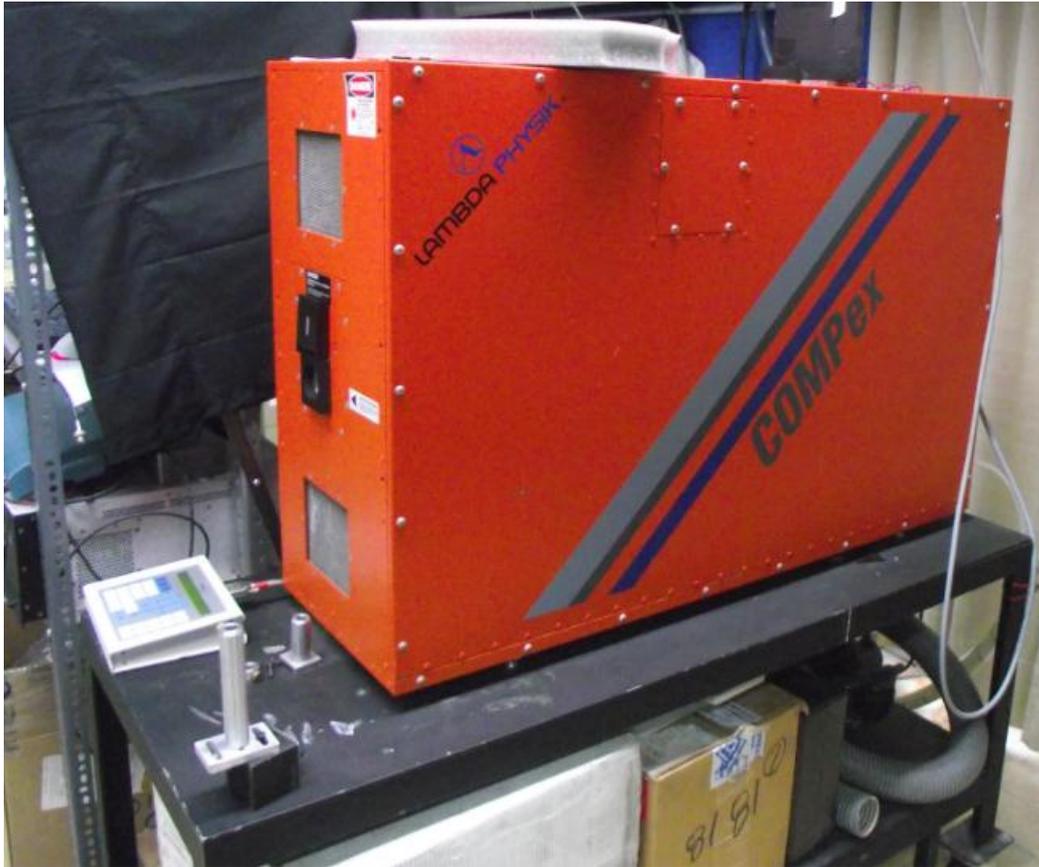


FIGURA 3.1 Láser excímero de KrF, emite en una longitud de onda de 248 nm y proporciona pulsos de hasta 100mJ con ancho temporal de 10-50 ns.

c) Osciloscopio Digital

Se utilizó un osciloscopio (Tektronix TDS500) que tiene un ancho de banda de 500MHz, una resolución máxima en voltaje de 1mV y una frecuencia de muestreo de 2GHz. Con la integración de estos dos últimos dispositivos (osciloscopio-detector más el software de procesamientos de los datos) se obtiene el medidor de energía.

3.2 PREPARACIÓN DEL DETECTOR DE ENERGÍA

Como se menciona es la unión de un sensor piezoeléctrico (olympus panametrics V310, ver FIGURA 3.2) y una pastilla solida compuesta por BaTiO_3 y partículas de tóner. Para elaborar la mezcla que conforma la pastilla se realizo lo siguiente: sobre un vaso de precipitado se depositaron 55 grs de BaTiO_3 en polvo, 1.5 grs de tóner y 50 ml de agua, estos se revolvieron con una espátula hasta formar una mezcla homogénea.

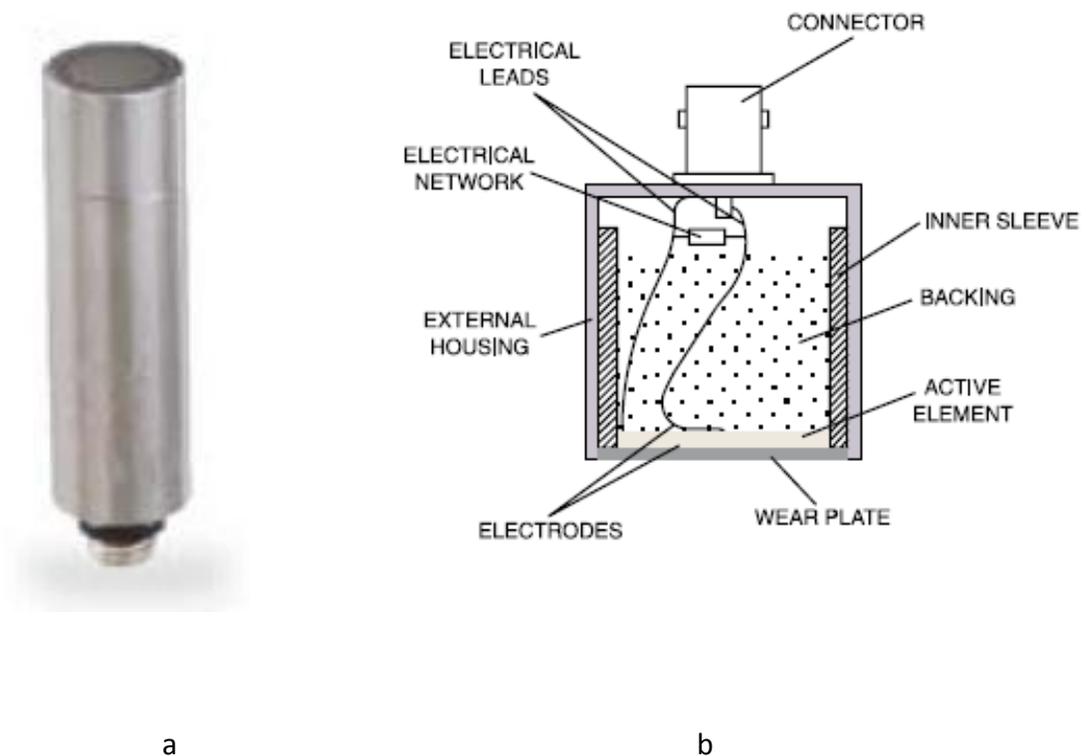


Figura. 3.2 a) Sensor piezoeléctrico comercial olympus panametrics V310 , b) Constitución interna del sensor piezoeléctrico V310,

Para formar la pastilla es eligió como molde una caja de petri de 5 cm de diámetro y 5mm de alto, para obtener un acoplamiento directo entre pastilla y sensor a la caja de petri se le realizo un orificio centrado de 9 mm de diámetro, por el cual se introdujo el sensor hasta una altura de 2.5mm con el objetivo de asegurar un buena adhesión entre mezcla-sensor, esto se muestra en la FIGURA 3.3.

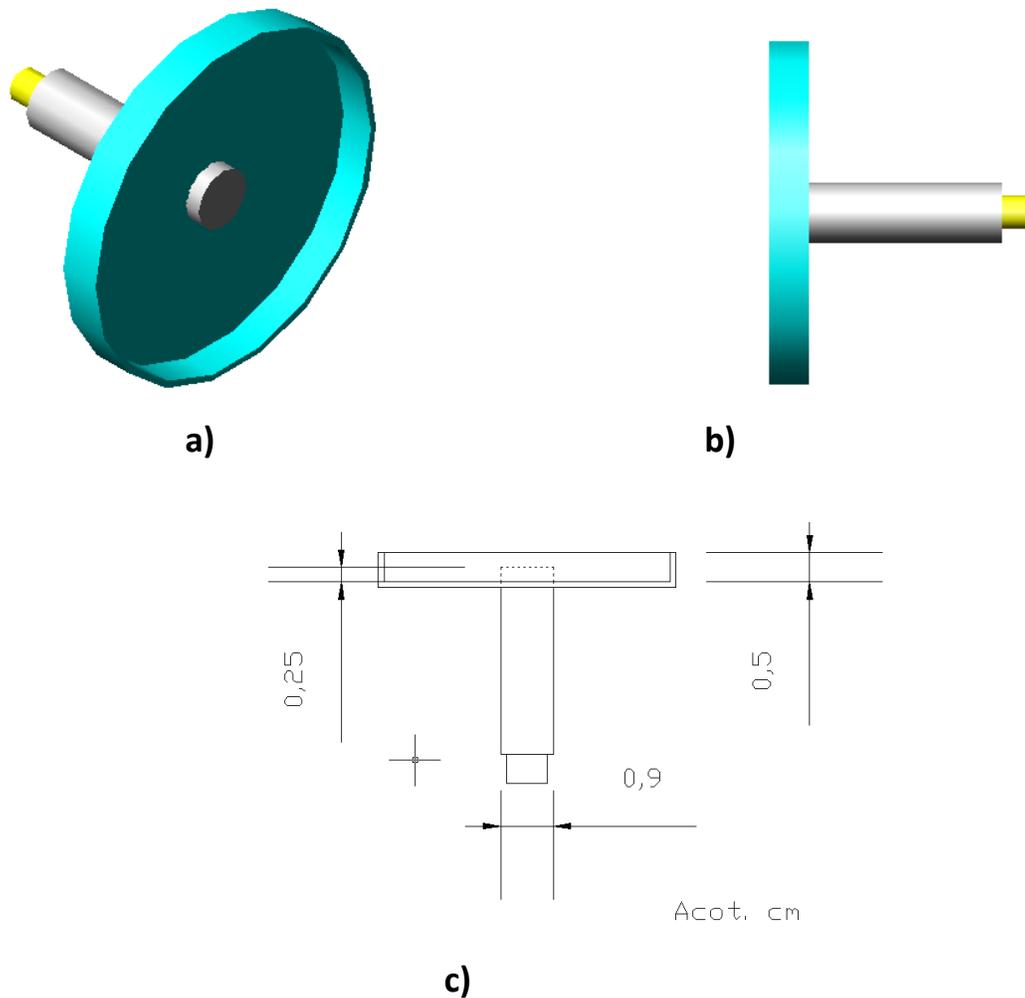
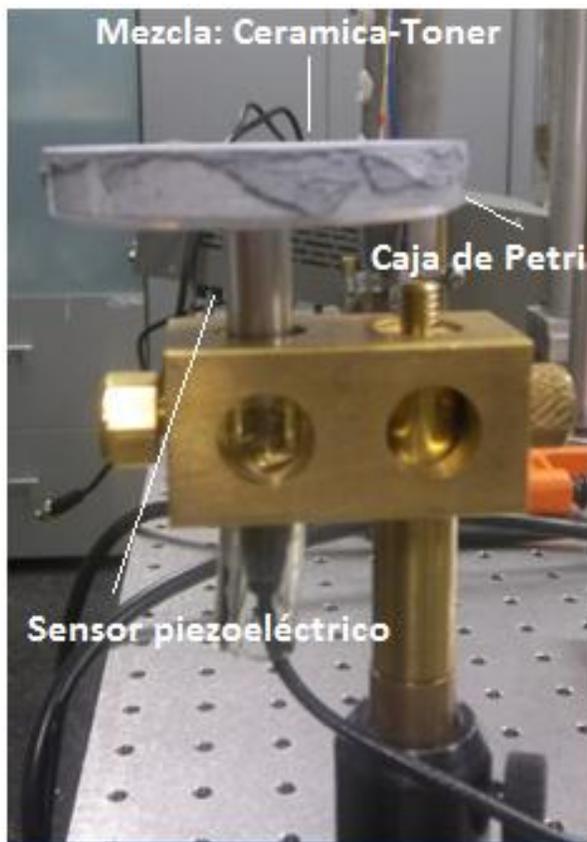
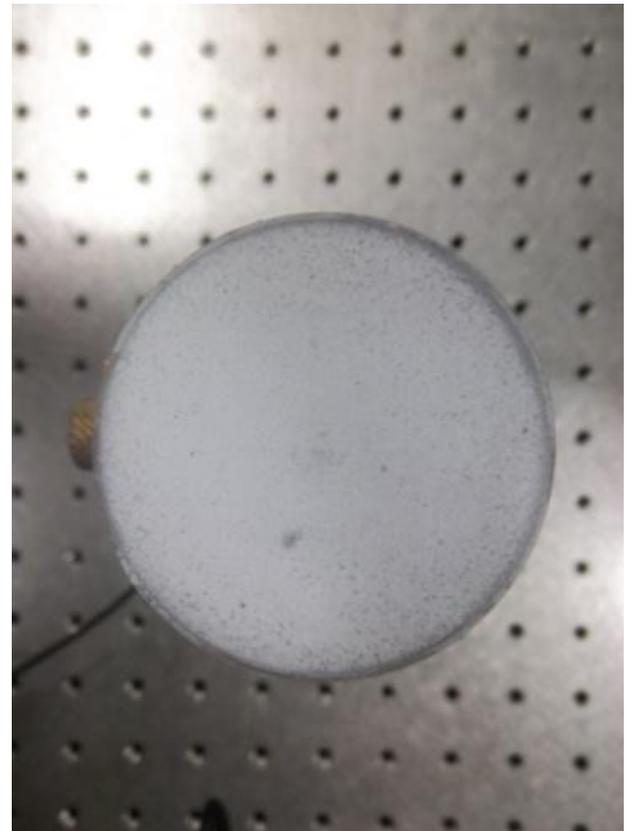


FIGURA 3.3 a) caja de petri fijada al sensor piezoeléctrico, b) vista lateral, c) vista lateral con dimensiones

Posteriormente el sensor y la caja se fijaron sobre una mesa óptica como se observa en la FIGURA 3.4, y enseguida se depositó la mezcla, en esta posición se dejó solidificar aproximadamente 2 días a temperatura ambiente. Se eligió depositar directamente la mezcla sobre el sensor para evitar utilizar un material de acoplamiento entre ambos que provocara que la señal fotoacústica fuera de menor amplitud, es decir que hubiese un menor acoplamiento acústico.



a)



b)

FIGURA 3.4 a) imagen del detector de energía fotoacústico sobre la mesa óptica donde se fija para depositar la mezcla de cerámica-tóner, b) toma superior del sensor sobre la mesa óptica.

3.3 CARACTERIZACION ESPECTROSCOPICA DE LA MEZCLA BATIO₃-TÓNER.

Como se sabe para la generación de señales fotoacústicas el material debe absorber en la longitud de onda con la cual se irradia, para este caso en específico, se irradia con un láser centrado en los 248 nm.

El espectro de absorción de la mezcla en el intervalo de 200-500 nm (UV-VIS), se realizó en el Instituto de Química de la UNAM con un espectrografo Shimadzu U160, en la FIGURA 3.5 se muestra dicho espectro, en donde se observa una banda de absorción en el intervalo de 240-290 nm aproximadamente, con un máximo en 264 nm. Por lo cual este material es adecuado para ser utilizado en la región UV.

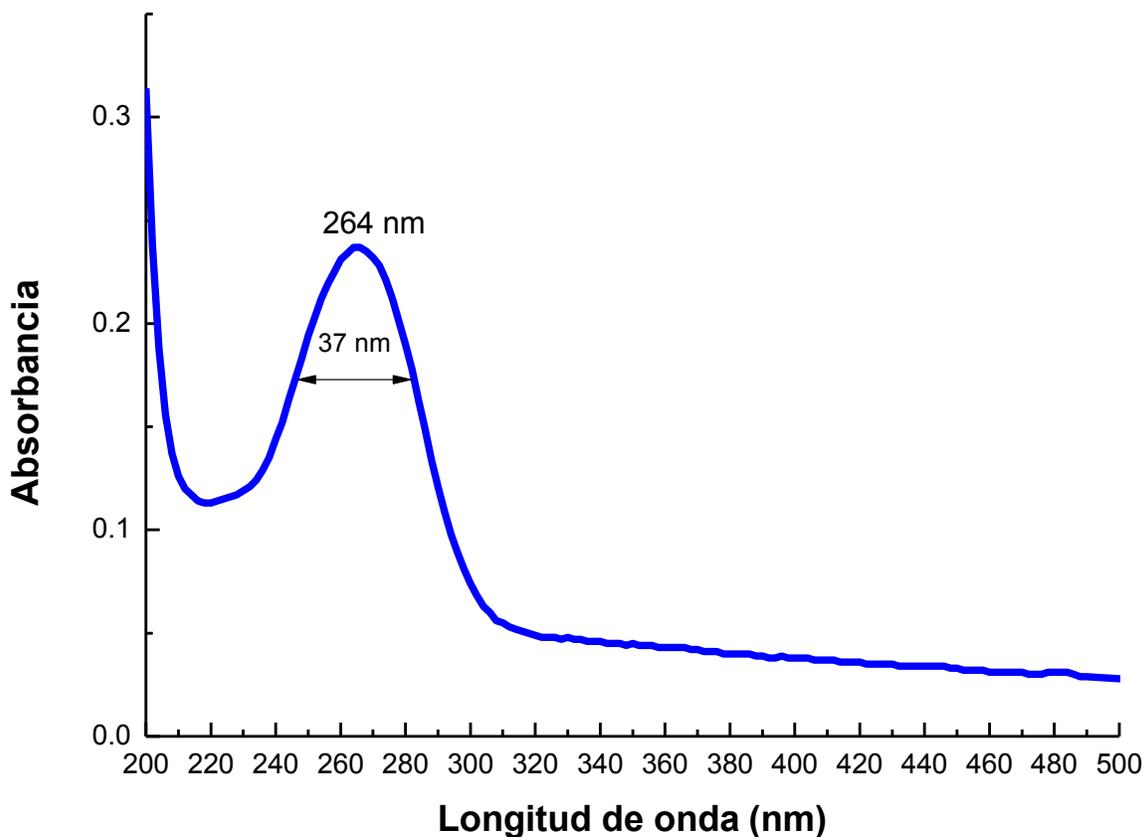


FIGURA 3.5 a) Espectro de absorción de la mezcla: BaTiO₃-Tóner.

3.4 CUANTIFICACIÓN DE ENERGÍA LÁSER A TRAVÉS DE SEÑALES FOTOACÚSTICAS

Para cuantificar la energía láser es necesario relacionar alguna variable de la señal fotoacústica con la energía láser que la genera. La variable que se eligió relacionar fue el área bajo la curva de la señal fotoacústica. Ya que la señal adquirida está representada por un conjunto de pares ordenados discretos, es necesario utilizar un método numérico que calcule el área bajo la curva. La regla trapezoidal es un método numérico que se basa en la integración de la fórmula de interpolación lineal. Supongamos que se evalúa.

$$A = \int_a^b f(x)dx \quad (3.1)$$

Donde, $f(x)$ representa la señal fotoacústica y A el área bajo la curva.

Si aproximamos $f(x)$ mediante interpolación lineal

$$g(x) = \frac{b-x}{b-a}f_1 + \frac{x-a}{b-a}f_2 \quad (3.2)$$

Donde

$$f_1 = f(a)$$

$$f_2 = f(b)$$

Entonces, la ecuación 3.1 se convierte en

$$A = \int_a^b f(x)dx \approx \int_a^b g(x)dx = \frac{h}{2}(f_1 + f_2) \quad (3.3)$$

Con

$$h = b - a$$

La ecuación 3.3 es la regla trapezoidal, que puede reescribirse como

$$A = \int_a^b f(x) dx = \frac{h}{2}(f_1 + f_2) + E \quad (3.4)$$

Donde E representa el error por truncado.

El área bajo la interpolación lineal $g(x)$, es igual a la integral por la regla trapezoidal, mientras que el área bajo $y = f(x)$ es el valor exacto. Por tanto, el error de la ecuación 3.4 es igual al área entre $g(x)$ y $f(x)$. Y es aproximadamente.

$$E = -\frac{1}{12}h^3f''$$

3.3 EXPERIMENTOS REALIZADOS

El experimento consistió en hacer incidir el haz láser sobre el detector de energía fotoacústico (descrito en el apartado 3.1b), y variar la energía desde 50mJ hasta 95mJ en intervalos de 5mJ a través de un control electrónico que tiene integrado el láser, esto se realizó 5 veces, el arreglo experimental se muestra en la Fig. 3.6.

Procedimiento detallado:

- a) Se colocó el detector de energía frente al láser.
- b) Se utilizó un diafragma de forma circular que sólo permite el paso de un área pequeña del haz, con el objetivo de centrar el haz sobre la parte de la cerámica que está en contacto directo con la parte activa del piezoeléctrico.
- c) Para iniciar la adquisición de las señales se utilizó un fotodiodo de respuesta rápida que es capaz de observar pulsos con ancho temporal de 5-7ns, éste se coloca a un costado del detector de energía.
- d) Posteriormente se procedió a la aplicación de pulsos láser sobre el detector.
- e) Adquirir las señales fotoacústicas con el osciloscopio en el cual se fijaron los siguientes parámetros:
 - Resolución temporal: 500 μ s/div
 - Resolución en amplitud: 5mV/div
 - Impedancia de entrada canal de la señal: 1M Ω
 - Impedancia de entrada canal de disparo (*trigger*): 50 Ω
 - Frecuencia de muestreo: 200 MS/s
 - Tiempo de promedio: 1min

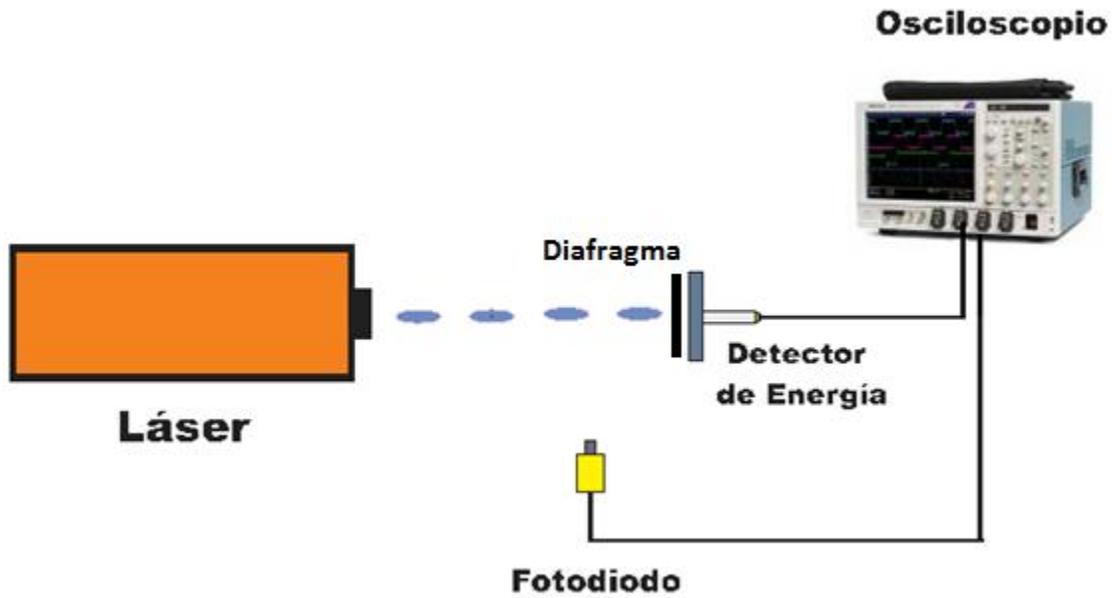


FIGURA 3.6 Esquemático del arreglo experimental, los pulsos del láser inciden de forma directa sobre el detector fotoacústico y el fotodiodo se utiliza para proporcionar la señal de disparo del osciloscopio.

3.4 ENERGÍA INCIDENTE SOBRE EL DETECTOR

La energía que incide sobre el detector (E_i), es sólo la que pasa a través del diafragma, (ver FIGURA 3.7), siendo ésta menor a la que está contenida en todo el spot (E_T). El área del spot es de 2.4 cm^2 y el diafragma tiene un área de 0.503 cm^2 , si suponemos que la distribución de la energía es uniforme sobre toda el área del spot, entonces, E_i se obtiene de la siguiente manera:

$$\frac{\text{Energía total}}{\text{Área del spot}} = \text{Fluencia total} = \frac{E_T}{2.4 \text{ cm}^2} = F_T \left[\frac{\text{J}}{\text{cm}^2} \right]$$

$$E_i = \text{Fluencia total} * \text{Área del diafragma} = F_T * 0.503 \text{ cm}^2 \text{ [J]}$$

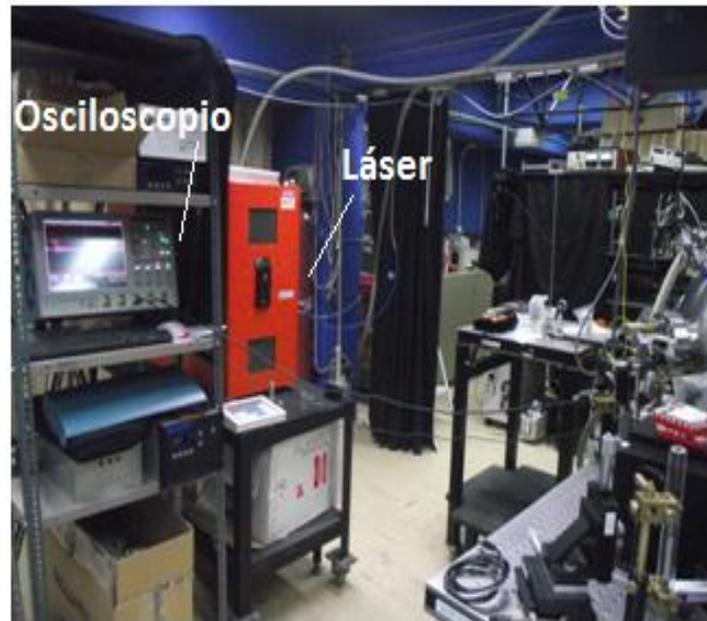
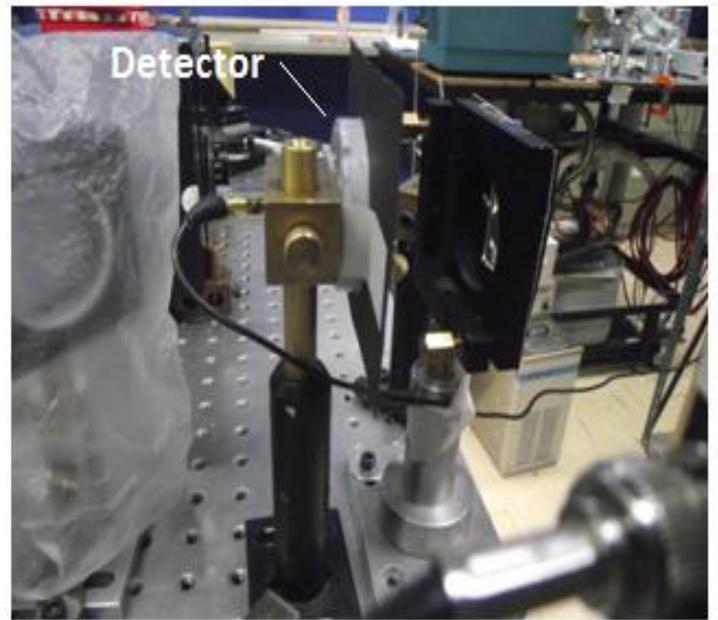
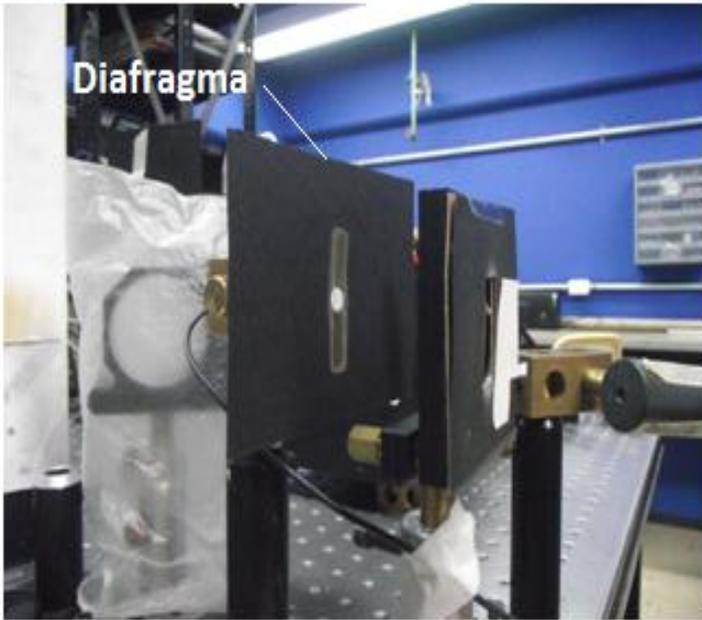


FIGURA 3.7 Montaje experimental, en esta imagen se observan los dispositivos utilizados: detector de energía fotoacústico, láser, osciloscopio, diafragma; la imagen fue tomada en el laboratorio de fotofísica del CCADET, lugar donde se realizaron las pruebas.

La energía de salida del láser se manipuló a través de un control electrónico, sin embargo, al fijar un valor, éste que no era el real; el láser tiene un medidor de energía integrado, el cual se utilizó para la calibración; las lecturas de éste fueron las siguientes (ver TABLA 3.1).

TABLA 3.1 *Comparación de valores reales de energía de salida y valores fijados con el control electrónico.*

ENERGÍA FIJADA CON EL CONTROL ELECTRÓNICO (mJ)	ENERGÍA REAL DE SALIDA (mJ)
50	45
55	51
60	57
65	60
70	66
75	72
80	75
85	81
90	84
95	90

En la tabla 3.2, se muestran los valores de energía que pasan a través del diafragma en relación con la energía real de salida contenida en todo el spot, estos valores se obtuvieron haciendo uso de las formulas desarrolladas en este apartado.

TABLA 3.2 *Valores de energía que pasan a través del diafragma*

ENERGÍA DE SALIDA (mJ)	ENERGÍA A TRAVÉS DEL DIAFRAGMA (mJ)
45	9.431
51	10.689
57	11.946
60	12.575
66	13.833
72	15.09
75	15.719
81	16.976
84	17.605
90	18.863

3.5 PROCESAMIENTO DE LAS SEÑALES

Las señales fotoacústicas generadas fueron almacenadas por el osciloscopio en archivos con formato .CSV. Se acondicionaron y procesaron a través de un programa realizado en MATLAB (FIGURA 3.8), el cual realiza las siguientes operaciones:

1. Carga el archivo en formato .CSV y genera una matriz de 2×100000 . La primera columna representa el tiempo y la segunda la amplitud.

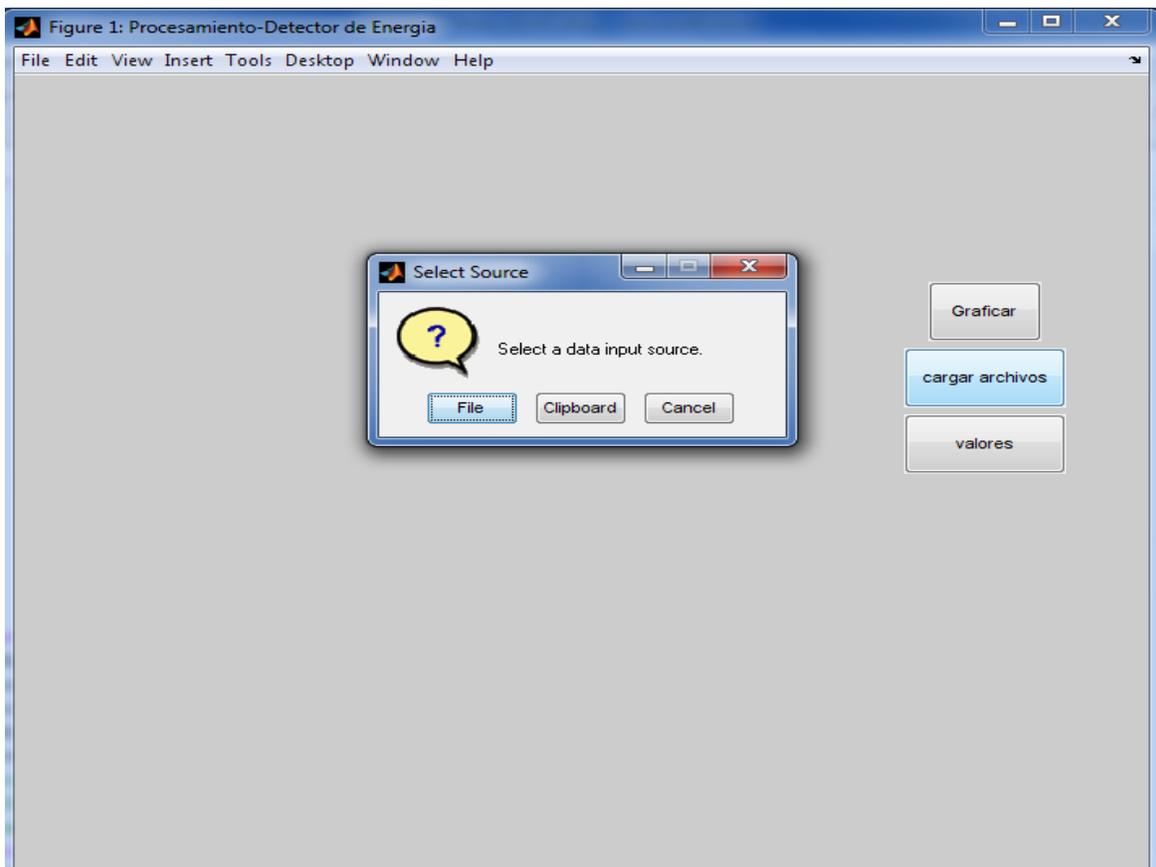


FIGURA 3.8 Programa de acondicionamiento y procesamiento de las señales del detector de energía, desarrollado en MATLAB.

2. Desecha todos los puntos en donde el tiempo es negativo. Esto se muestra en las FIGURA 3.9a y 3.9b.

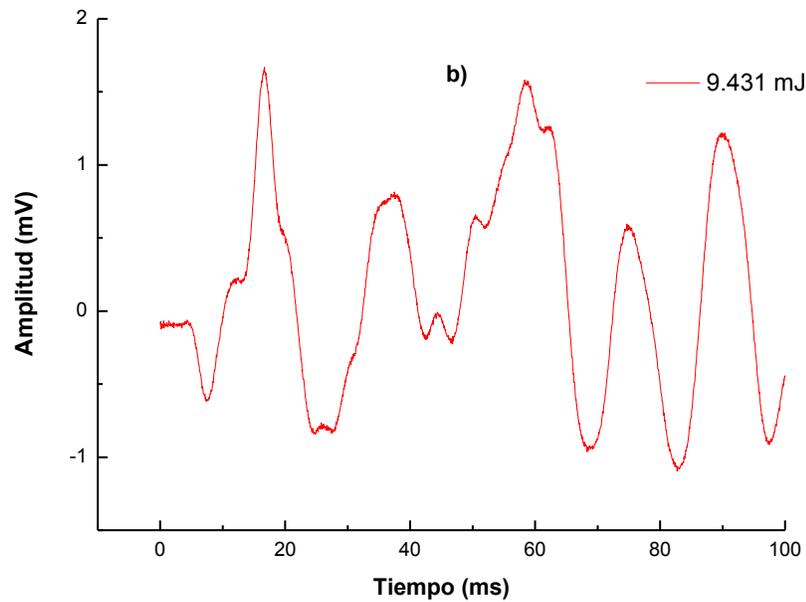
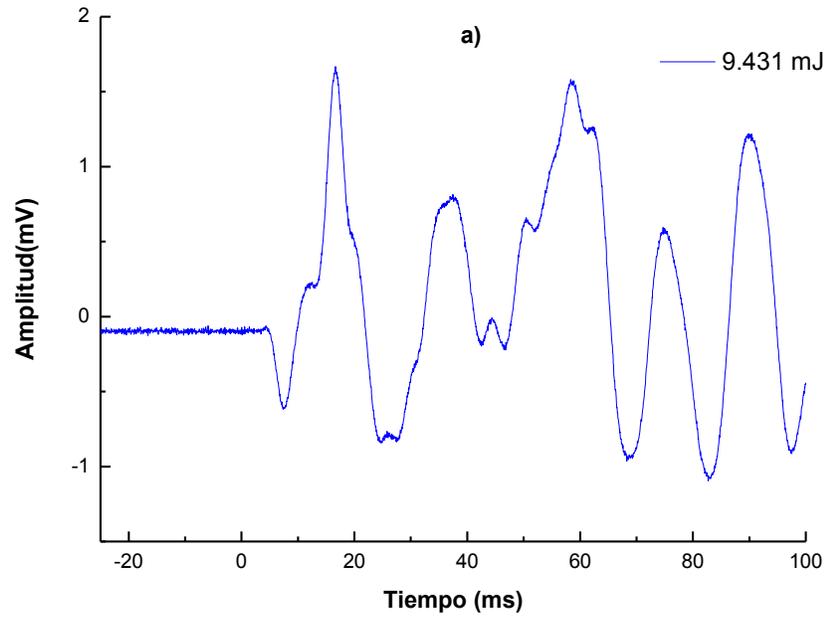


FIGURA 3.9, a) Señal no recortada en el eje X (tiempo), b) Señal solo con valores positivos en el tiempo.

3. Elimina el offset con respecto a la amplitud, para realizar esto, se promedia toda la señal y el resultado se resta a la señal original. Esto se muestra en las FIGURA 3.10a y 3.10b.

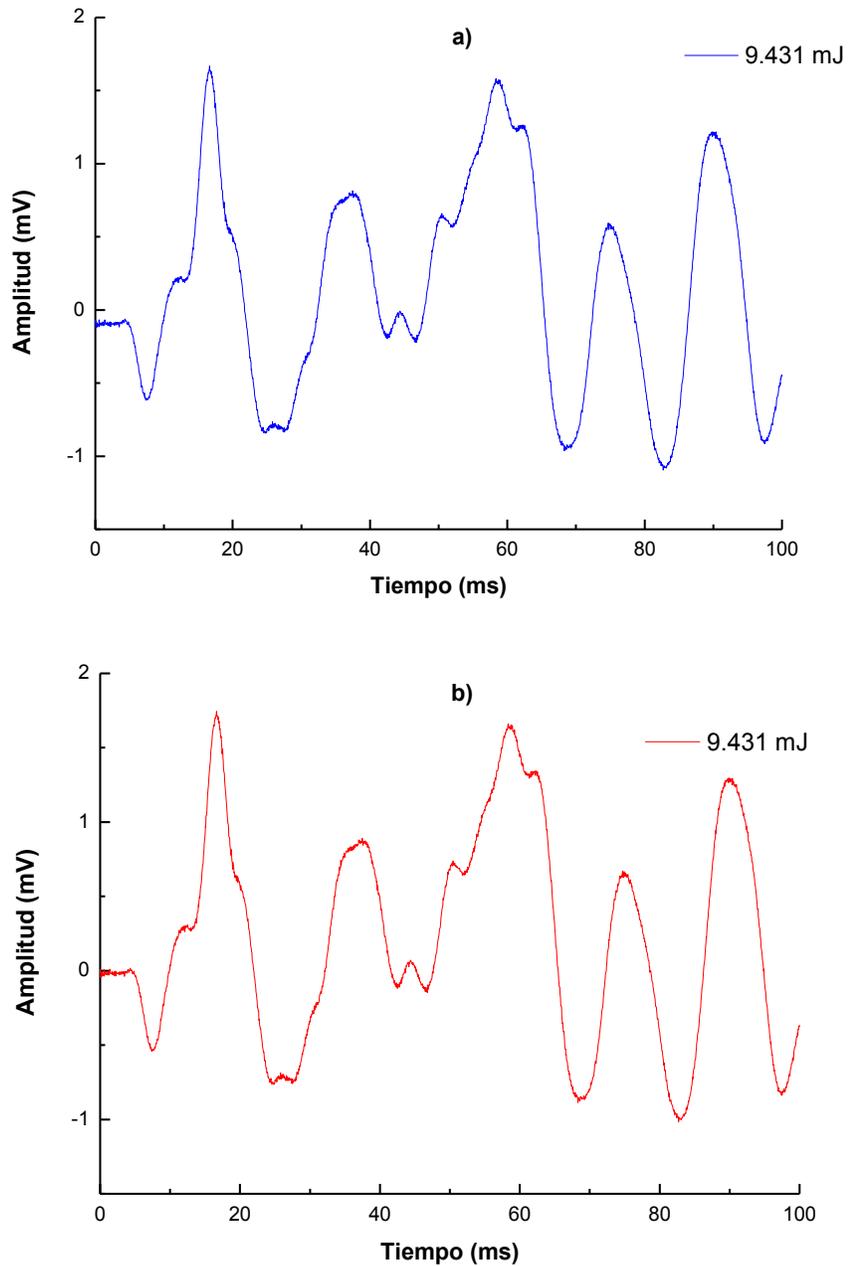


FIGURA 3.10 a) Señal no ajustada a cero en el eje Y (amplitud), b) Señal ajustada a cero (eliminación del offset) en el eje Y.

4. Calcula el área bajo la curva de las señales fotoacústicas acondicionadas haciendo uso de la función “trapz” de MATLAB, la cual usa el método trapezoidal. En la figura 3.11 se observan las señales fotoacústicas adquiridas en un experimento.

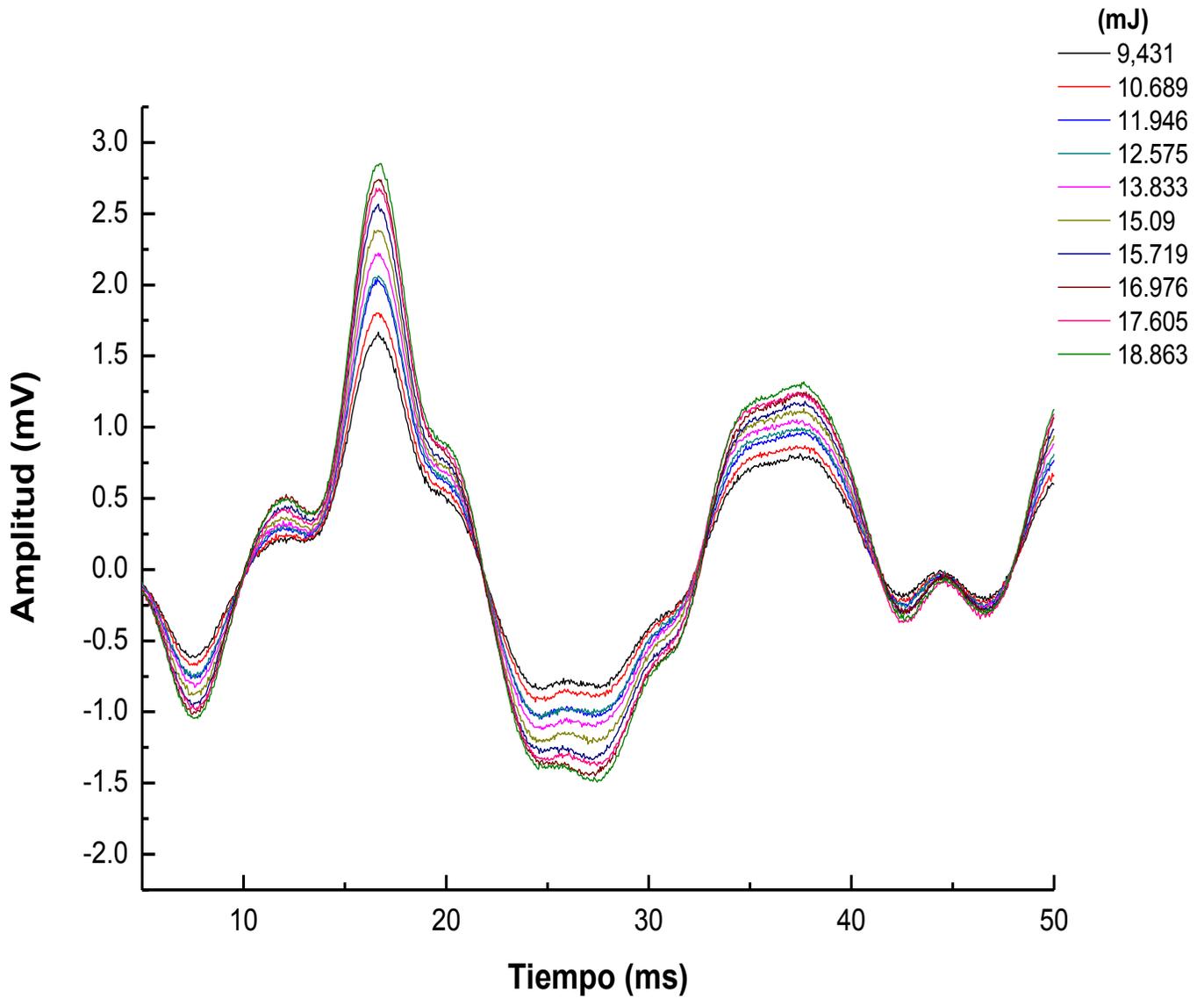


FIGURA 3.11 Señales fotoacústica generadas para diez valores diferentes de energía láser, aquí se observa el incremento de la amplitud conforme se incrementa la energía.

Los valores calculados por el programa realizado en MATLAB son posteriormente analizados en ORIGIN, el cual permite graficarlos y analizarlos. En la FIGURA 3.12 se observa la hoja de trabajo.

	A(X)	B(Y)	C(Y)	D(Y)	E(Y)	F(Y)
Long Name						
Units						
Comments						
1	1	7.19629E-8	7.26544E-8	#####	7.33211E-8	6.81205E-8
2	2	8.32417E-8	7.92184E-8	#####	7.87482E-8	7.45693E-8
3	3	9.01715E-8	8.97374E-8	8.24563E-8	8.91627E-8	8.39863E-8
4	4	#####	9.06953E-8	8.47128E-8	9.04355E-8	8.75329E-8
5	5	1.00948E-7	9.75354E-8	9.47763E-8	9.92943E-8	9.64047E-8
6	6	1.10822E-7	1.05255E-7	1.01886E-7	1.06111E-7	#####
7	7	1.16688E-7	1.12757E-7	#####	1.10004E-7	1.07386E-7
8	8	1.20421E-7	1.22536E-7	1.12797E-7	1.20403E-7	1.10913E-7
9	9	1.30432E-7	1.18731E-7	1.20054E-7	1.25498E-7	1.17859E-7

FIGURA 3.12 Hoja de trabajo en origin de los valores generados por el programa desarrollado en MATLAB.

En las siguientes figuras se muestran las graficas de los 5 experimentos realizados.

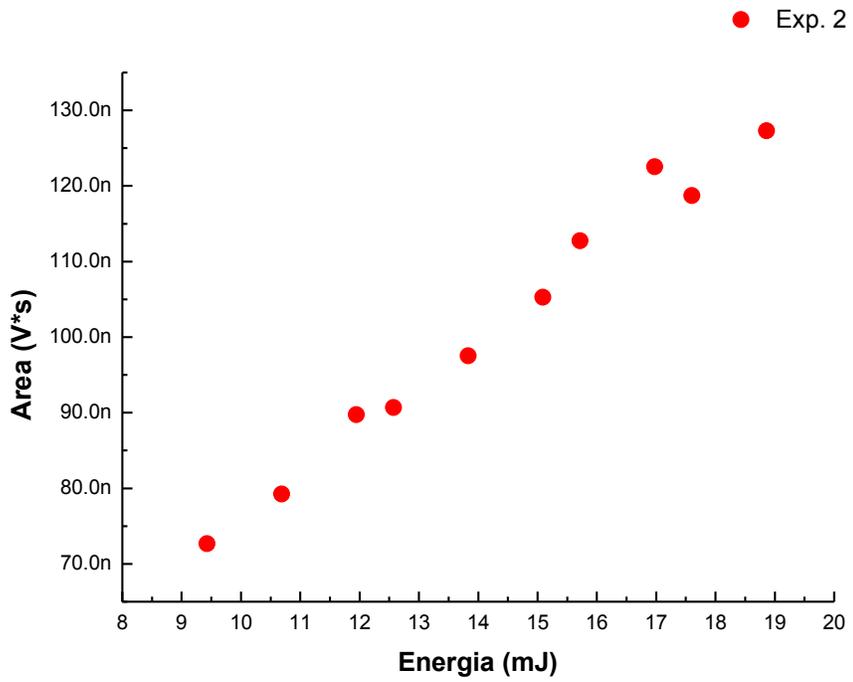
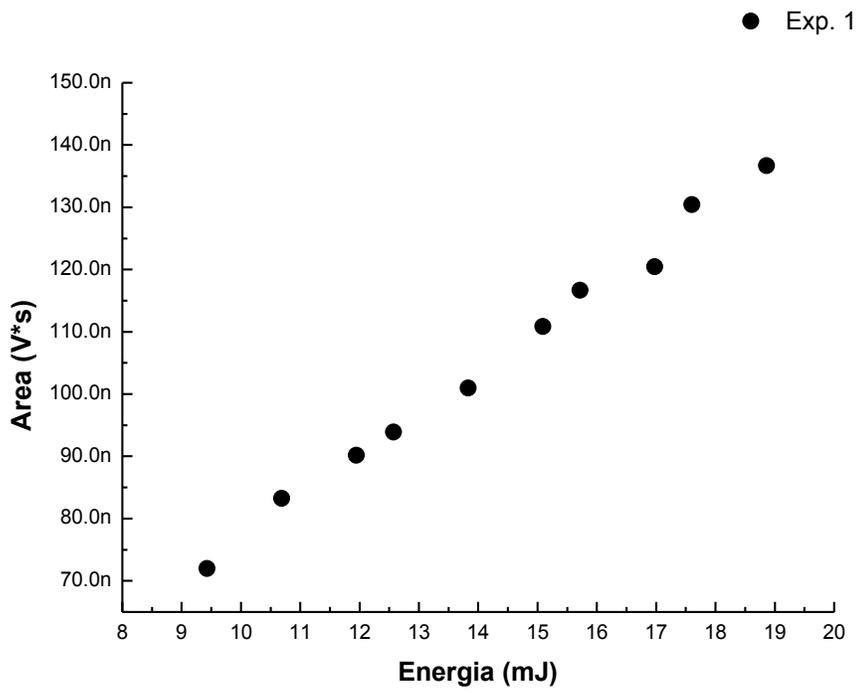


FIGURA 3.13 Gráficas de Energía Vs Área del experimento 1 y 2.

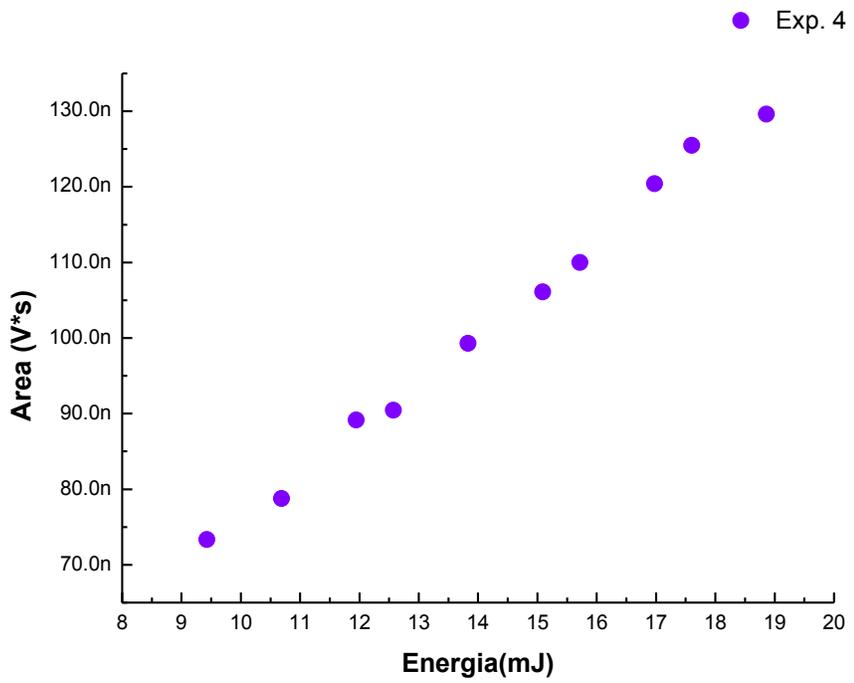
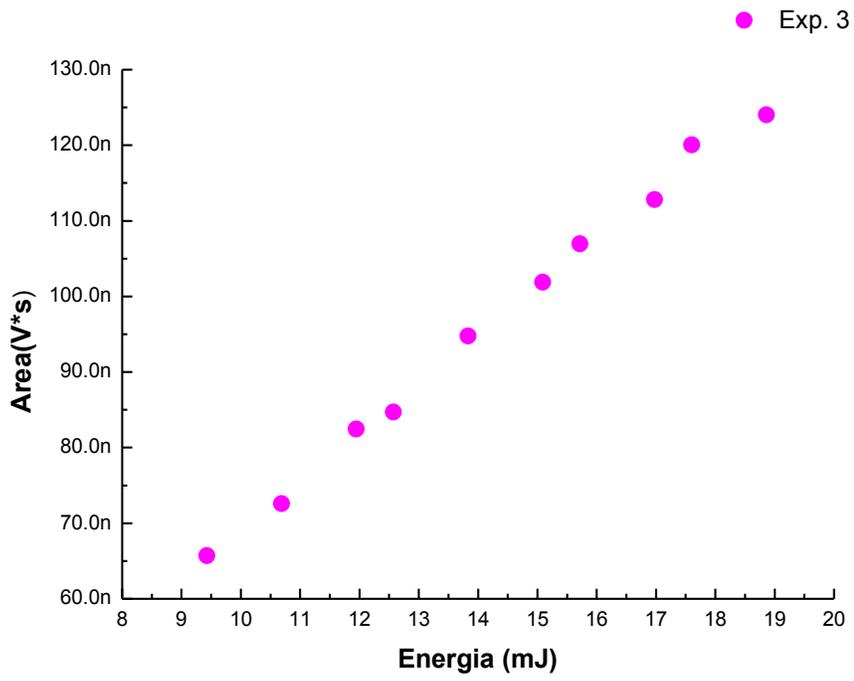


FIGURA 3.14 Gráficas de Energía Vs Área del experimento 3 y 4.

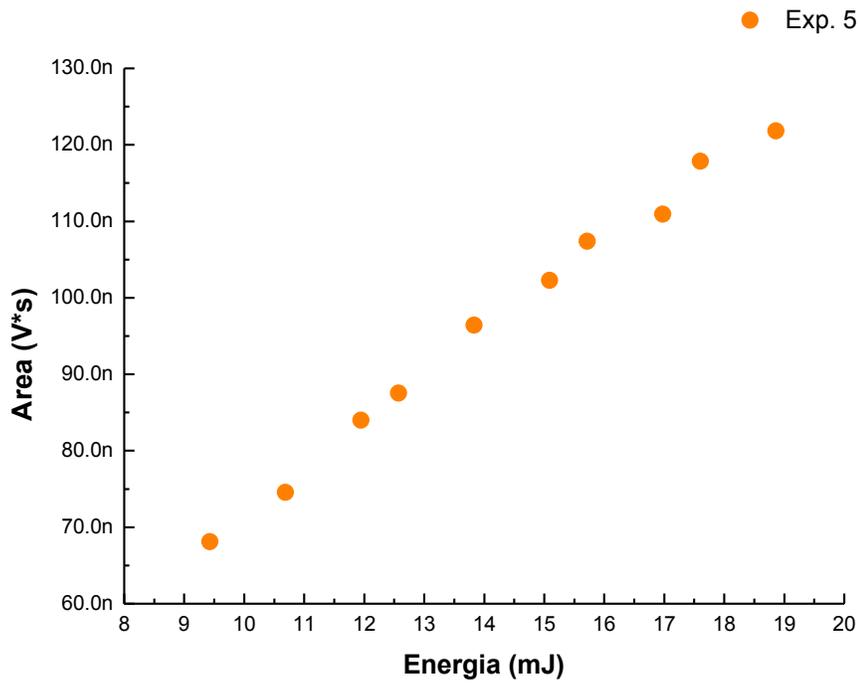


FIGURA 3.15 Gráfica de Energía Vs Área del experimento 5.

En estas gráficas se utilizó el valor de la energía que pasa a través del diafragma (tabla 3.1). Para así, posteriormente calibrar el detector de energía fotoacústico.

CAPÍTULO 4. CALIBRACIÓN Y PRUEBAS DEL SENSOR

En este capítulo se muestra el procedimiento desarrollado para obtener la calibración del medidor de energía.

4.1 PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN

Como se observa en los experimentos desarrollados en el capítulo 3, la amplitud de la señal fotoacústica se incrementa conforme aumenta la energía láser incidente sobre el detector y, por lo tanto, el área bajo la curva de la señal también aumenta. Para tener una relación que nos permita calcular el valor de la energía en función del área bajo la curva (calibración), es necesario procesar y analizar las señales. Los datos de los experimentos fueron analizados en ORIGIN, la metodología fue la siguiente:

1. Los cálculos del área bajo la curva realizados con el programa desarrollado en MATLAB (capítulo 3) fueron tabulados en hojas de trabajo en ORIGIN. En total fueron diez niveles diferentes de energía por cada experimento.
2. Los datos de los cinco experimentos se visualizaron en una gráfica (FIGURA 4.1).

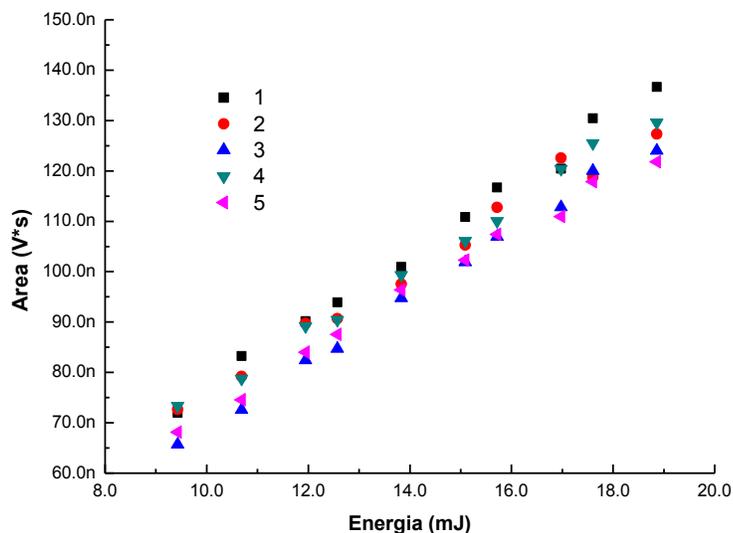


FIGURA 4.1 Datos de los cinco experimentos realizados.

3. Con las herramientas de ORIGIN se realizó un ajuste lineal al promedio de los cinco experimentos (FIGURA 4.2). Ajustar una curva implica relacionar una función $g(x)$ a un conjunto de datos (x_i, y_i) , $i = 1, 2, \dots, L$. La función $g(x)$ elegida para ajustar una curva debe tener cierto número de coeficientes no determinados. En general, el número de puntos por ajustar L , es mucho mayor que el número de coeficientes no determinados k ; por tanto, el método para determinar los coeficientes se basa en la minimización de las discrepancias entre la función determinada y los puntos; a este procedimiento se le denomina método de mínimos cuadrados. Para el caso de un ajuste lineal lo que se busca es ajustar una colección de datos a una recta de la forma $y = a + bx$. En la FIGURA 4.3, se muestra el ajuste lineal realizado al promedio de los 5 experimentos FIGURA 4.2.

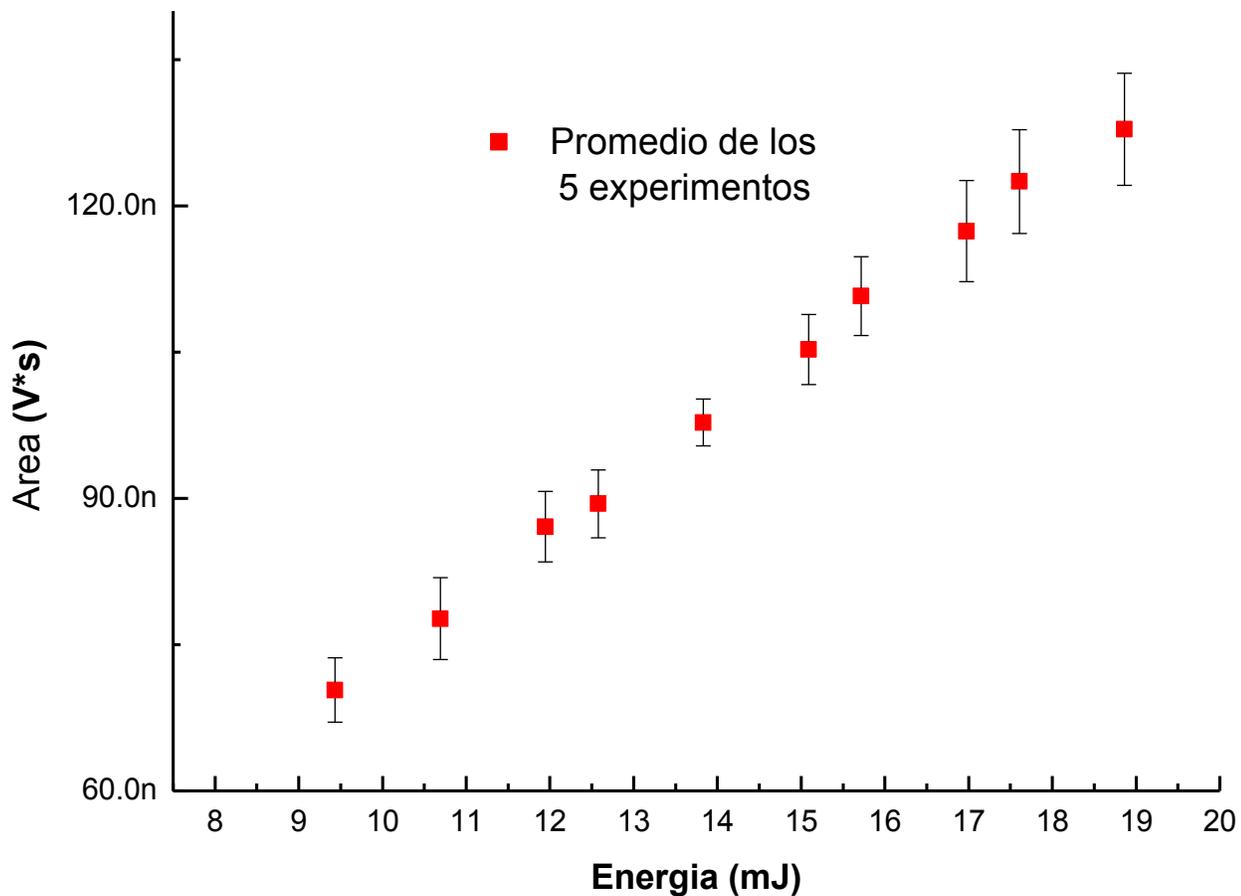


FIGURA 4.2 Grafica del promedio de los cinco experimentos realizados.

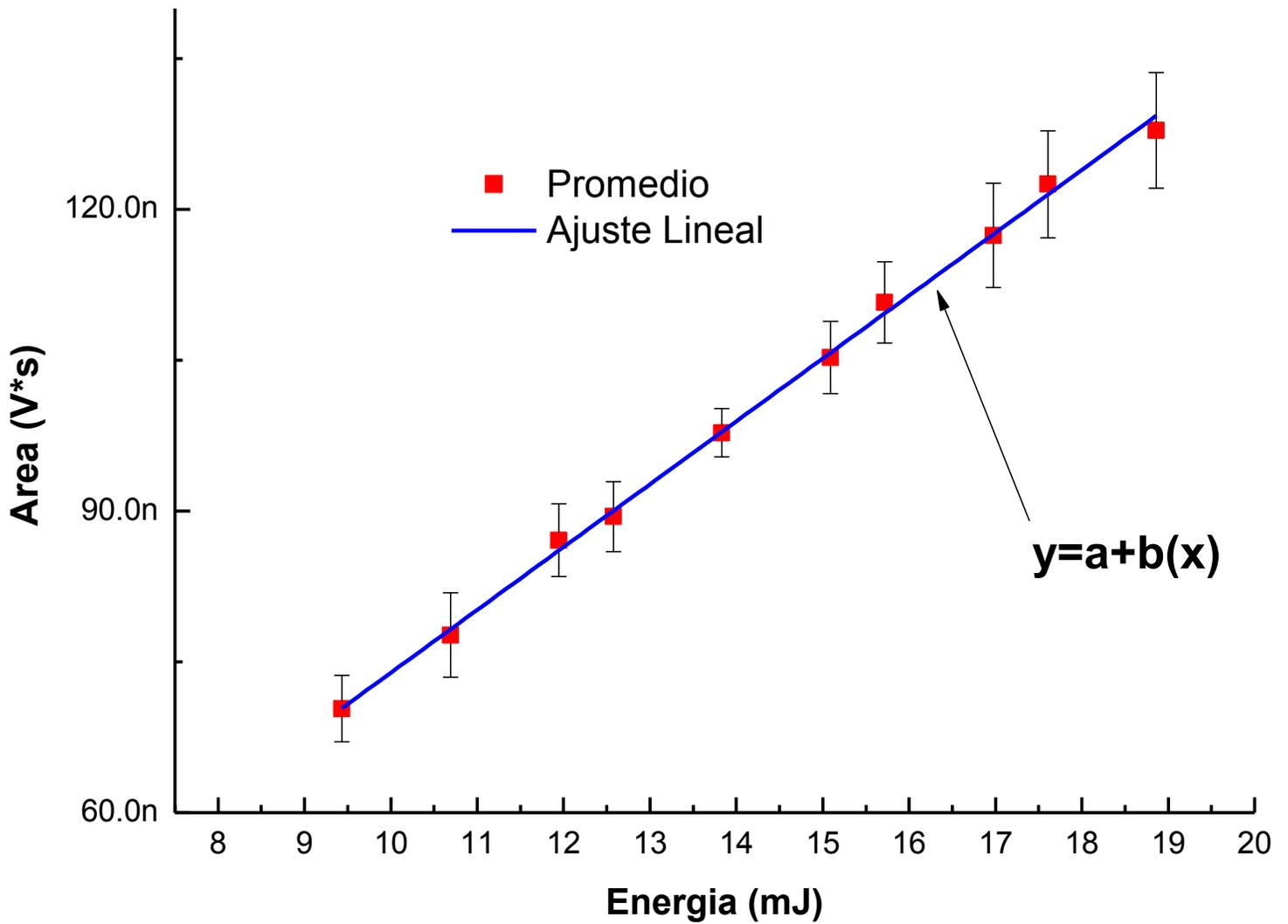


FIGURA 4.3 Curva de calibración (ajuste lineal), Energía Vs Área bajo la curva. De esta gráfica se obtiene el valor de la energía láser en función del área bajo la curva de la señal fotoacústica.

$$Y = a + b(x)$$

$$a = 1.14032E-8$$

$$b = 6.25197E-9$$

4.2 PRUEBAS

Para verificar el funcionamiento del medidor de energía se realizaron pruebas, las cuales consistió en generar señales fotoacústicas para cinco valores diferentes de energía (9.431, 11.946, 13.833, 15.719, 17.605) mJ, donde el orden fue aleatorio. Los archivos de las señales fueron cargados en el programa de MATLAB descrito en el capítulo 3 (FIGURA 4.4), el cual, haciendo uso del ajuste lineal realizado en el apartado 4.1, calculó la energía correspondiente para cada una de las señales adquiridas. En el ajuste, la variable independiente es X, que representa a la energía, mientras que la variable dependiente es Y, que representa el área bajo la curva. La relación funcional del ajuste realizado a la gráfica del promedio de los experimentos es $y = a+bx$, por tanto, para calcular la energía en función del área bajo la curva, es necesario reordenar la ecuación de la forma siguiente:

$$x = \frac{y - a}{b}$$

$$\text{Energía} = \frac{\text{Área bajo la curva} - 1.14032\text{E} - 8}{6.25197\text{E} - 9}$$

Esta última expresión se ingresa al código del programa y, junto con las expresiones descritas en el apartado 3.1, se calcula la energía incidente sobre el detector.

El programa muestra una gráfica y una tabla de resultados de las mediciones (FIGURA 4.5).

En las FIGURA 4.5 y 4.7 se resumen los resultados de las mediciones.

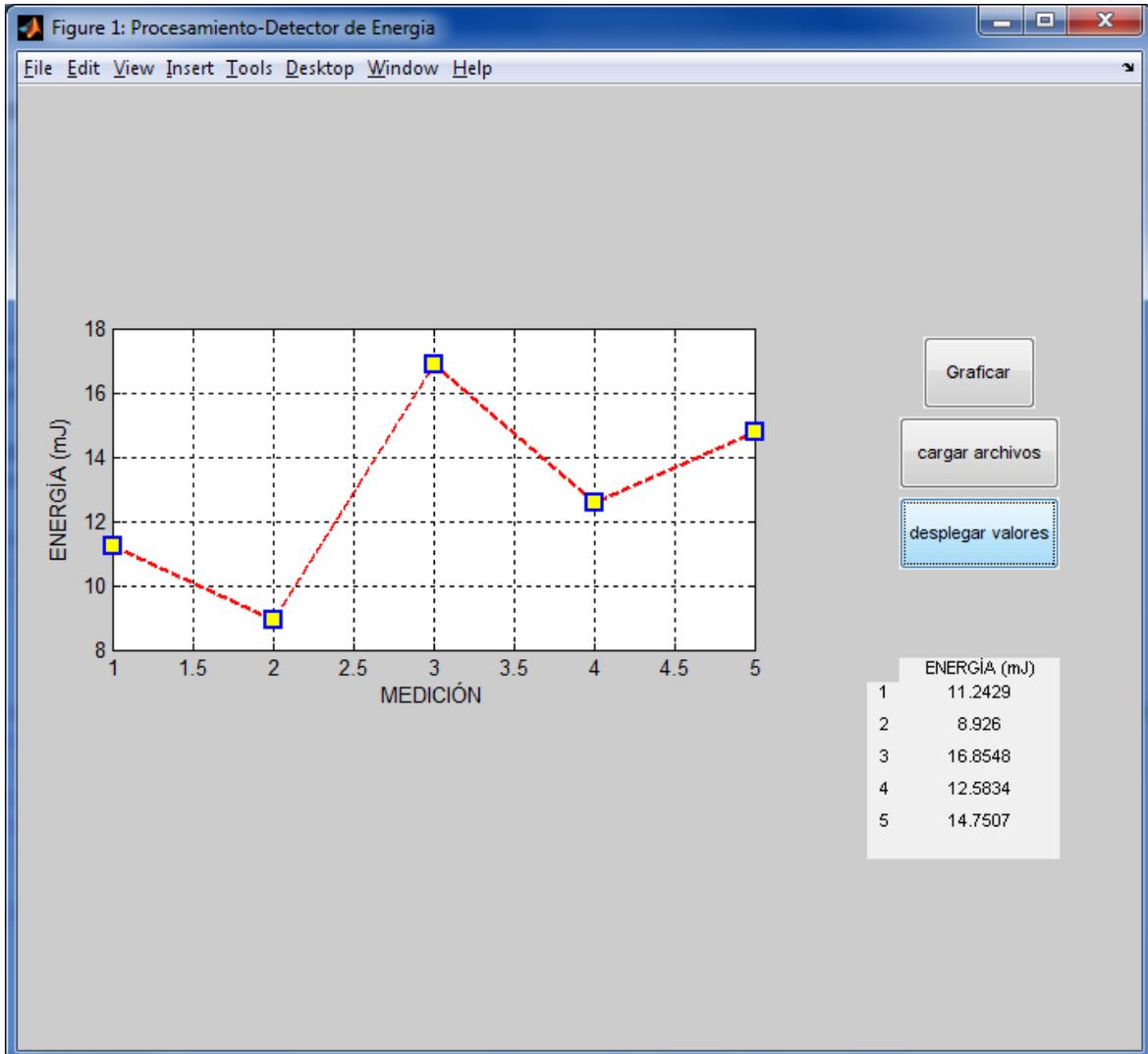


FIGURA 4.4 Gráfica de los valores y mediciones de prueba.

FIGURA 4.1 *Tabla de valores de energía que pasan a través del diafragma, de acuerdo al medidor de calibración y el medidor de energía fotoacústico.*

ENERGÍA QUE PASA A TRAVÉS DEL DIAFRAGMA (mJ)	ENERGÍA INCIDENTE DE ACUERDO AL MEDIDOR FOTOACÚSTICO (mJ)	ERROR ABSOLUTO
11.946	11.243	5.88%
9.431	8.926	5.35%
17.605	16.855	4.26%
13.833	12.583	9.04%
15.719	14.751	6.16%

De los resultados que se resumen en las tablas anteriores se obtiene un error promedio de 6.14%, este error es con respecto al valor teórico que pasa a través del diafragma. Los resultados desplegados en graficas y tablas, muestran que la relación funcional entre área bajo la curva y energía láser es lineal.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

En este trabajo se implementó un medidor de energía láser basado en el efecto fotoacústico, calibrado a una longitud de onda de 248nm, frecuencia de 10Hz y para un intervalo de energía de 10 hasta 20 mJ. La implementación consistió de tres etapas: detección, adquisición y procesamiento; la primera se logró a través de un sensor piezoeléctrico, inmerso en un material cerámico, la adquisición de las señales fotoacústicas se realizó con un osciloscopio en el cual se utilizó la respuesta de un fotodiodo como señal de disparo y para el procesamiento se desarrolló un programa en MATLAB que calcula y presenta de manera gráfica los valores de la energía promedio de los pulsos láser.

La calibración del detector se realizó a través de un análisis estadístico y una regresión lineal a datos de cinco experimentos en los cuales se realizó un barrido de 10 niveles de energía en cada uno, utilizándose como referencia el medidor que tiene integrado el láser.

Los cálculos y gráficas muestran que dentro del intervalo de calibración, el comportamiento de las señales fotoacústicas en función de la energía láser es lineal.

Los parámetros del medidor desarrollado en forma global son los siguientes:

- Intervalo de energía en el que se calibro: [10-20] mJ
- Frecuencia de los pulsos: 10Hz
- Error promedio: 6.14%

Cabe destacar que en un principio el objetivo era abarcar un intervalo mayor de longitudes de onda para la calibración, específicamente de 200 a 400 nm, sin embargo el dispositivo que proporcionaría dicho intervalo se encontraba descompuesto, por lo que solo se realizó la calibración con un láser de excímero que emite en una longitud de 248nm.

APÉNDICE A. MEDIDORES DE ENERGÍA LÁSER COMERCIALES

MARCA	TIPO DE DETECTOR	MODELO	INTERVALO DE ENERGÍA	INTERVALO ESPECTRAL	FRECUENCIA MAXIMA DE PULSOS
Ophir	Fotodiodo	PD10	20nJ-20mJ	0.19-1.1µm	10 KHz
Consolas Vega, Nova II, LaserStar, Nova, Orion	Fotodiodo	PD10-pJ	200pJ-200nJ	0.2-1.1µm	10KHz
		PD10-IR-pJ	200pJ-20nJ	0.7-1.8µm	10 KHz
		Piroeléctrico	PE9	2µJ-10mJ	0.15-12µm
	PE9-F		2µJ-10mJ	0.15-12µm	25KHz
	PE10-C		2µJ-10mJ	0.15-12µm	25 KHz
	PE10BF-C		10µJ-10mJ	0.15-3µm	500Hz
	PE25-C		200µJ-10J	0.15-3µm	10KHz
	PE25BF-C		2mJ-10J	0.15-3µm	250Hz
	PE50-C		200µJ-10J	0.15-3µm	10KHz
	Piroeléctrico Para alta energía	PE50BF-C	2nJ-10J	0.15-3µm	250Hz
		PE50-DIF-C	200µJ-10J	0.19-3µm	10KHz
		PE25BF-DIF-C	2µJ-10J	0.19-2.2µm	250Hz
		PE50BF-DIF-C	2mJ-10J	0.19-2.4µm	250Hz
		PE50-DIF-ER	2mJ-10J	0.19-3µm	400MHz
	RP	PE100BF-DIF	200mJ-40J	0.15-3µm	250Hz
FL250A-RP		100mW-250W	0.4-1.1µm	15KHz	
L1500W-LP1-RP		100W-1500W	1J-200J	15KHz	

Referencia: <http://www.ophiropt.com/laser-measurement-instruments/laser-power-energy-meters/products/energy-sensors>

MARCA	TIPO DE DETECTOR	MODELO	INTERVALO DE ENERGÍA	INTERVALO ESPECTRAL	FRECUENCIA MAXIMA DE PULSOS
Scitec Instruments	Piroeléctrico	PEM4	1µJ-20mJ	0.19-25µm	120Hz
Consolas LEM 2420		PEM8	2µJ-75mJ	0.19-25µm	100Hz
		PEM11	3µJ-150mJ	0.19-25µm	80Hz
		PEM21	5µJ-500mJ	0.19-25µm	50Hz
		PEM34	15µJ-1.4J	0.19-25µm	80Hz
		PEM45	30µJ-2J	0.19-25µm	100Hz

Referencia: http://www.scitec.uk.com/laser_power_energy/laser_energy_heads

MARCA	TIPO DE DETECTOR	MODELO	INTERVALO DE ENERGÍA	INTERVALO ESPECTRAL	FRECUENCIA MAXIMA DE PULSOS
Delta Developments	Fotodiodo	Model 27	10nJ-3µJ	0.3-1.1µm	200Hz
		Model 49	50pJ-15nJ	0.3-1.1µm	200Hz
		Model 50	50pJ-15nJ	0.3-1.1µm	200Hz
Referencia: http://www.delta-dev.co.uk/pulsed1.htm					

MARCA	TIPO DE DETECTOR	MODELO	INTERVALO DE ENERGÍA	INTERVALO ESPECTRAL	FRECUENCIA MAXIMA DE PULSOS
Coherent	Piroeléctrico	J-50MB-HE	1 mJ-2J	0.19-12.0	300Hz
Consola -FieldMax. -LabMax II		J-50MB-LE	250µJ-500mJ	0.19-12.0	300Hz
		J-25MB-HE	500µJ-1J	0.19-12.0	1000Hz
		J-25MB-LE	25µJ- 50mJ	0.19-12.0	1000Hz
		J-10MB-HE	10 µJ-20mJ	0.19-12.0	1000Hz
		J-10MB-LE	300nJ-600µJ	0.19-12.0	1000Hz
		J-50MT-10KHZ	500µJ-1J	0.19-2.1	10KHz
		J-25MT-10KHZ	50µJ-100mJ	0.19-2.1	10KHz
		J-10MT-10KHZ	100nJ-200µJ	0.19-2.1	10KHz
		J-50MB-YA	1.5mJ-3J	0.266-2.1	50
		J-50MB-IR	1mJ-3J	0.5-3.0	30Hz
		J-25MB-IR	1.5mJ-3J	0.532-2.1	20Hz
		J-50MUV-248	500µJ-1J	0.19 -2.1	200Hz
		J-50MUV-193	125µJ-250mJ	0.19 -2.1	200Hz
		J-25MUV-248	125µJ-250mJ	0.19-2.1	400Hz
		J-25MUV-193	50 µJ-100mJ	0.19-2.1	400Hz
		fotodiodo	J-10SI-LE	8pJ-80nJ	325-900
J-10SI-HE	60pJ- 775nJ		325-900	10KHz	
J-10GE	200pJ-600nJ		800-1700	10KHz	
Referencia: http://www.coherent.com/downloads/COHR_LMC_2011-2010catalog.pdf					

MARCA	TIPO DE DETECTOR	MODELO	INTERVALO DE ENERGÍA	INTERVALO ESPECTRAL	FRECUENCIA MAXIMA DE PULSOS
Gentec-EO	Piroeléctrico	QE8SP-I-BL-USB	20 nJ-20mJ	100nm-1000µm	400 Hz
Consolas Maestro Solo 2 S-link-2 p-link		QE8SP-I-MT-USB	20 nJ-2mJ	100nm-1000µm	1000 Hz
		QE8SP-I-BL-BNC	60 nJ-3mJ	100nm-1000µm	400 Hz
		QE8SP-I-MT-BNC	100 nJ-50mJ	100nm-1000µm	40000 Hz
		QE8SP-B-BL	50 nJ-20mJ	100nm-1000µm	400 Hz
		QE8SP-B-MT-USB	50 nJ-20mJ	100nm-1000µm	1000 Hz
		QE8SP-B-MT-BNC	100 nJ-20mJ	100nm-1000µm	40000 Hz
		QE23SP-B-BL	100 nJ-200mJ	100nm-1000µm	400 Hz
		QE23SP-B-MT-USB	100 nJ-200mJ	100nm-1000µm	1000 Hz
		XLE4	150 nJ-4mJ	350nm-2.5µm	2000 Hz
		QE23SP-B-MT-BNC	500 nJ-200mJ	100nm-1000µm	40000 Hz
		QE4SP-S-BL	15 µJ-16mJ	190nm-20µm	1200 Hz
		QE4SP-S-MT	1 µJ-43mJ	190nm-20µm	6000 Hz
		QE12LP-S-MB	700 nJ-850mJ	190nm-20µm	300 Hz
		QE12LP-S-MB + QED-12	3 µJ-3.9 J	190nm-25µm	300 Hz
		QE12LP-H-MB	700 nJ-850mJ	190nm-20µm	300 Hz
		QE12LP-H-MB + QED-12	3 µJ-3.9 J	190nm-25µm	300 Hz
		QE12SP-S-MT	800 nJ-700mJ	190nm-20µm	6000 Hz
		QE12SP-S-MT + QED-12	25 µJ-1.6 J	190nm-25µm	6000 Hz
		QE12SP-H-MT	800 nJ-700mJ	190nm-20µm	6000 Hz
		QE12SP-H-MT + QED-12	25 µJ-1.6 J	190nm-25µm	6000 Hz
		QE25LP-S-MB	4 µJ-3.8 J	190nm-20µm	300 Hz
		QE25LP-S-MB	15 µJ-23 J	190nm-	300 Hz

		+ QED-25		25µm	
		QE25LP-H-MB	4 µJ-3.8 J	190nm- 20µm	300 Hz
		QE25LP-H-MB + QED-25	15 µJ-23 J	190nm- 25µm	300 Hz
		QE25SP-S-MT	2 µJ-3 J	190nm- 20µm	6000 Hz
		QE25SP-S-MT + QED-25	6 µJ-10 J	190nm- 25µm	6000 Hz
		QE25SP-H-MT	2 µJ-3 J	190nm- 20µm	6000 Hz
		QE25SP-H-MT + QED-25	6 µJ-10 J	190nm- 25µm	6000 Hz
		QE50LP-S-MB	10 µJ-15 J	190nm- 20µm	200 Hz
		QE50LP-S-MB + QED-50	30 µJ-85 J	190nm- 25µm	200 Hz
		QE50LP-H-MB	10 µJ-15 J	190nm- 20µm	200 Hz
		QE50LP-H-MB + QED-50	30 µJ-85 J	190nm- 25µm	200 Hz
		QE50SP-S-MT	10 µJ-13 J	190nm- 20µm	4000 Hz
		QE50SP-S-MT + QED-50	30 µJ-44 J	190nm- 25µm	4000 Hz
		QE50SP-H-MT	10 µJ-13 J	190nm- 20µm	4000 Hz
		QE50SP-H-MT + QED-50	30 µJ-44 J	190nm- 25µm	4000 Hz
		QE65LP-S-MB	10 µJ-50 J	190nm- 20µm	100 Hz
		QE65LP-S-MB + QED-65	30 µJ-125 J	190nm- 25µm	100 Hz
		QE65LP-H-MB	10 µJ-50 J	190nm- 20µm	100 Hz
		QE65LP-H-MB + QED-65	30 µJ-125 J	190nm- 25µm	100 Hz
		QE65ELP-S-MB	20 µJ-25 J	190nm- 20µm	20 Hz
		QE65ELP-S-MB + QED-65	60 µJ-200 J	190nm- 25µm	20 Hz
		QE65ELP-H- MB	20 µJ-25 J	190nm- 20µm	20 Hz
		QE65ELP-H- MB + QED-65	60 µJ-200 J	190nm- 25µm	20 Hz
		QE95LP-S-MB	15 µJ-35 J	190nm- 20µm	40 Hz
		QE95LP-S-MB	45 µJ-150 J	190nm-	40 Hz

		+ QED-95		25µm	
		QE95LP-H-MB	15 µJ-35 J	190nm-20µm	40 Hz
		QE95LP-H-MB + QED-95	45 µJ-150 J	190nm-25µm	40 Hz
		QE95ELP-MB	30 µJ-70 J	190nm-20µm	10 Hz
		QE95ELP-S-MB + QED-95	90 µJ-250 J	190nm-25µm	10 Hz
		QE95ELP-H-MB	30 µJ-70 J	190nm-20µm	10 Hz
		QE95ELP-H-MB + QED-95	90 µJ-250 J	190nm-25µm	10 Hz
	Fotodiodo	M5-6-Si	2 nJ-200µJ	350nm-1.1µm	130000 Hz
		M5-6-Si-L	20 pJ-2µJ	350nm-1.1µm	130000 Hz
		M5-6-In	2 nJ-200µJ	350nm-1.6µm	130000 Hz
		M5-6-In-L	20 pJ-2µJ	350nm-1.6µm	130000 Hz
		M5-6-PY	200 nJ-20mJ	350nm-600nm	130000 Hz
		M5-12.5-PY	200µJ - 200mJ	350nm-2.5µm	130000 Hz
Referencia: http://gentec-eo.com/products/energy-detectors					

MARCA	TIPO DE DETECTOR	MODELO	INTERVALO DE ENERGÍA	INTERVALO ESPECTRAL	FRECUENCIA MAXIMA DE PULSOS
Thorlabs	Piroeléctrico	ES111C	10 µJ – 150 mJ	0.185 - 25 µm	
Consolas PM-100D		ES120C	100 µJ – 500 mJ	0.185 - 25 µm	
		ES145C	500 µJ – 2 J	0.185 - 25 µm	
		ES220C	500 µJ – 3 J	0.185 - 25 µm	
		ES245C	1 mJ – 15 J	0.185 - 25 µm	
Referencia: http://www.thorlabs.com/NewGroupPage9.cfm?ObjectGroup_ID=3337					

APÉNDICE B. CÓDIGO EN MATLAB DEL PROGRAMA DE ACONDICIONAMIENTO Y PROCESAMIENTO

```
function pro %generacion de interfaz gráfica

f=figure('Visible','off','Position',[360,500,700,600]);

%boton graficar
graficar= uicontrol('Style','pushbutton','String','Graficar',...
'Position',[550,400,70,45],...
'Callback',{@graficar_datos});

%boton cargar archivos
cargar_archivos= uicontrol('Style','pushbutton','string','cargar
archivos',...
'Position',[550,350,100,45],...
'Callback',{@archivos});

%boton desplegar valores
Valores= uicontrol('Style','pushbutton','string','desplegar valores',...
'Position',[550,300,100,45],...
'Callback',{@valores})

align([graficar,cargar_archivos],'Center','None');
set([f,graficar,cargar_archivos],...
'Units','normalized');
set(f,'Name','Procesamiento-Detector de Energia')
movegui(f,'center')

set(f,'Visible','on');

set([f,graficar,cargar_archivos],...
'Units','normalized');

n=0 v=0; i=0; q=0; b=0; y=0;
r2=0; r3=0; integ=0; integ2=0; contador=0;
z2=0; z1=0; suma=0; j=0; z11=0;
media=0; offst=0; trigger2=1;

%funcion para acondicionar y procesar la señal
function archivos(source,eventdata)
    b=b+1;
    q=uiimport

for i=1:length(q.data)
    x=q(1,1).data(i,1);
if (x<0)
cont=i+1;
                    contador=cont-1;
end
end
```

```

        z2=cont+65535;
        z1=q(1,1).data(cont:z2,1:2);
        z11=q(1,1).data(cont:z2,1);
        z12=q(1,1).data(cont:z2,2);
med=sum(z12);
        media=med/(length(z12));
        z111=q(1,1).data(cont:z2,1,:);
st=z12-media;
        integ2=5E-8*(trapz(st(1:20001,1)))
        v(b)=(integ2-1.14032E-8)/6.25197E-9

```

end

```

%funcion para graficar los valores
function graficar_datos(source,eventdata)
ha(2)=axes('Units','Pixels','Position',[60,250,400,200]);
plot(v,'--rs','LineWidth',2,...
'MarkerEdgeColor','b',...
'MarkerFaceColor','y',...
'MarkerSize',10)
grid
xlabel('MEDICIÓN');ylabel('ENERGÍA (mJ)');
clear

```

end

```

% funcion para mostrar los valores
function valores(source,eventdata)
ec= uicontrol(gcf,'Style','text','string','ENERGÍA (mJ)',...
'Position',[550,250,100,25])
ed= uicontrol(gcf,'Style','text','string',num2str(v),...
'Position',[550,180,100,70])
end

```

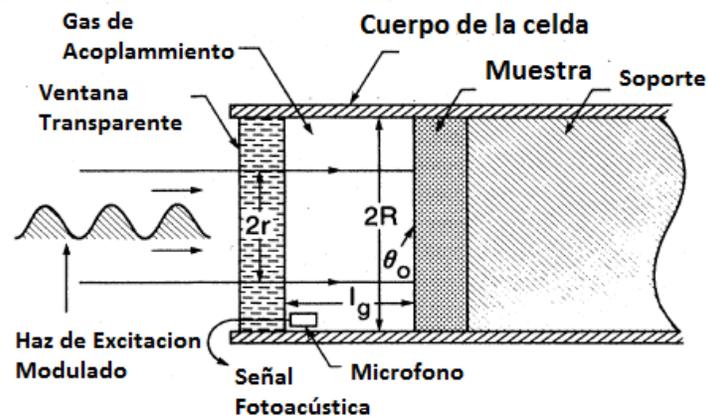
end

APÉNDICE C. GENERACIÓN DE SEÑALES FOTOACÚSTICAS

D.1 Fotoacústica clásica con celda

Modelo de Rosencway y Gersho

En el modelo teórico de Rosencway y Gersho [31] (conocido como modelo RG) se considera como el principal mecanismo de la señal fotoacústica a la difusión de calor, generado en la muestra hacia el gas en el interior de la celda. En este modelo se realiza un análisis unidimensional del flujo de calor en la celda y se demuestra que solo una capa relativamente delgada de aire en su interior, de unas decimas de centímetro de espesor adyacente a la superficie del sólido, responde térmicamente al flujo de calor periódico proveniente del sólido. Esta capa de aire sufre un calentamiento y un enfriamiento alternado, el cual genera la señal acústica detectada.



A1. Celda fotoacústica para la generación indirecta de señales fotoacústicas.

D.1.2 Descripción de la teoría simple de generación fotoacústica mediante pistón térmico.

Un caso simple de generación fotoacústica indirecta se ilustra en la Figura A1. Si tenemos un haz láser de radio r modulado a un frecuencia f , que incide sobre una muestra de espesor l en una celda cilíndrica de radio R ; si $l \gg \mu_s$ el espesor del gas adyacente acoplado, α el coeficiente de atenuación óptica para una longitud de onda y $\mu_a = 1/\alpha$, la longitud de absorción óptica. La componente modulada del calentamiento inducido por el láser se distribuye sobre una longitud de difusión dada por

$$\mu = [D_s/(\pi f)]^{1/2}$$

Donde D_s es la difusividad térmica de la muestra. Aquí asumimos que la longitud de onda y la frecuencia de modulación del láser se eligen de forma tal, que μ_s sea mas corta que l y μ_a , como se indica en la Figura A2.

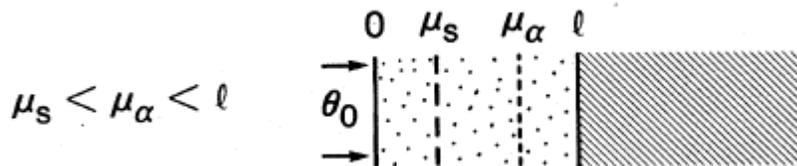


Fig. A2. Sólidos Térmicamente gruesos

Si la intensidad del haz laser modulado se representa por.

$$I(t) = \frac{1}{2} I_o (1 + \sin 2 \pi f t)$$

El calor activo producido dentro de la longitud de difusión μ_s , será solo la fracción μ_s/μ_a de la potencia de entrada, que se absorbe sobre una profundidad μ_a . La expresión para la conducción de calor aplicado a la geometría del la figura A2, es la siguiente.

conductividad térmica × gradiente térmico
 = *potencia térmica dentro de la longitud de difusión*

Es decir

$$k_s(\theta_0/\mu_s) = I_o(\mu_s/\mu_a)$$

Por lo tanto

$$\theta_0 = I_o \frac{\alpha \mu_s^2}{k_s}$$

Donde k_s es la conductividad térmica de la muestra, $\alpha = 1/\mu_a$ y θ_0 es la amplitud de la variación de la temperatura sobre la superficie de la muestra, térmicamente acoplada a un volumen activo del gas V_{act} dado por.

$$V_{act} = \pi r^2 s_g$$

Donde

$$s_g = \begin{cases} \mu_g & \text{para } l_g > \mu_g \\ l_g & \text{para } l_g < \mu_g \end{cases}$$

Aquí, μ_g es la longitud de difusión térmica del gas. Haciendo uso de la ley de los gases ideales, la amplitud δV del cambio en el volumen de V_{act} es.

$$\delta V = V_{act} \theta_0 / T$$

Donde T es la temperatura absoluta. Ahora la fluctuación de volumen δV provoca una fluctuación de presión δP sobre el micrófono. Asumiendo una relación presión-volumen adiabática, se tiene.

$$\delta P = \gamma P \delta V / V_o$$

Donde γ es la relación de calor específico y V_o es el volumen total de la celda dado por

$$V_o = \pi R^2 l_g + V_r$$

Donde V_r es el volumen residual en la celda, combinado las ecuaciones anteriores, se obtiene la amplitud de la señal fotoacústica δP como.

$$\delta P = \frac{\gamma P S_g r^2}{T(R^2 l_g + V_r/\pi)} \theta_o$$

$$\delta P = \frac{\gamma P S_g r^2 I_o}{T(R^2 l_g + V_r/\pi)} \frac{\alpha \mu_s^2}{k_s}$$

En esta última ecuación se observa que la señal es directamente proporcional al coeficiente de absorción óptica.

D.3 Fotoacústica directa sobre muestras solidas (régimen termoelástico)

En la generación termoelástica la radiación láser incidente no causa daño sobre la muestra, aquí la generación de ultrasonido se descompone en tres procesos: 1) absorción de la radiación electromagnética por el medio, 2) la consecuente difusión térmica y 3) el proceso elastodinámico debido a la expansión térmica.

D3.1 Modelo unidimensional

Para este modelo desarrollado por White 1963 [21], se tomo en cuenta lo siguiente, la radiación calienta uniformemente la superficie de un cuerpo semi-infinito, cuya superficie libre se ubica en $z=0$, ver figura A1. Como resultado del incremento de temperatura $\delta T(z, t)$, se genera una tensión ε_{zz} dada por.

$$\varepsilon_{zz} = \frac{\partial u(z, t)}{\partial z} = \alpha \delta T(z, t)$$

Donde u es la componente z del desplazamiento de la partícula y α es el coeficiente de expansión térmica lineal.

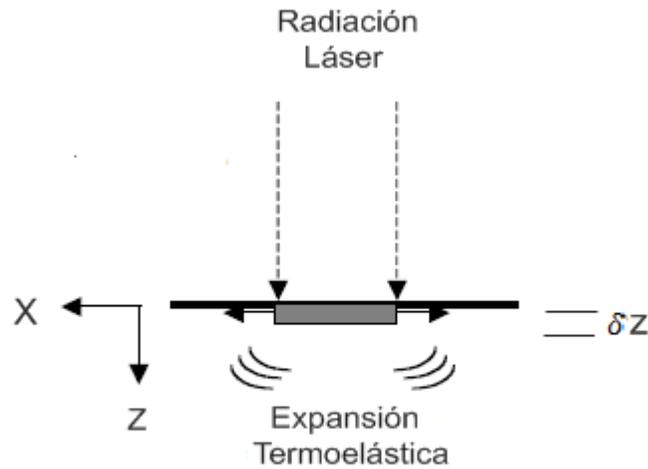


FIGURA A.1 *Expansión termoelástica unidimensional*

En este modelo debe notarse que no se toman en cuenta los esfuerzos en las direcciones x y y . Por lo tanto solo se generan ondas compresivas perpendiculares a la superficie con frentes de onda planos. Bajo estas condiciones la relación esfuerzo-tensión, se convierte en.

$$\sigma_{zz} = (\lambda + 2\mu)\varepsilon_{zz} - 3\mathbf{B}\alpha\delta T$$

Donde $\mathbf{B} = \lambda + \frac{2}{3}\mu$ es el modulo de elasticidad. La ecuación de movimiento por lo tanto es.

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - 3\mathbf{B}\alpha \frac{\partial T}{\partial z}$$

En ausencia de restricciones externas normales a la superficie, el esfuerzo a través de la superficie debe ser cero, es decir $\sigma_{zz}(z = 0) = 0$. Sin embargo, existen inmediatamente esfuerzos termoelásticos debajo de la superficie. Por lo tanto existe una tensión ε_{zz} en la superficie dado por.

$$\varepsilon_{zz}(z = 0) = \frac{3\mathbf{B}\alpha\delta T}{\lambda + 2\mu}$$

Esto se manifiesta como un aumento de la superficie, dada por.

$$u = \frac{3\mathbf{B}\alpha}{\lambda + 2\mu} \delta z \delta T$$

Donde δz es la profundidad sobre la cual hay un incremento de temperatura que se asume constante. Ya que el incremento de temperatura está relacionado con la densidad de energía depositada $\delta e = \delta E/A$, se tiene que.

$$\delta T = \frac{\delta e}{\rho C \delta z}$$

Por lo tanto sustituyendo $3\mathbf{B} = 3\lambda + 2\mu$, se obtiene

$$u = \left(\frac{3\lambda + 2\mu}{\lambda + 2\mu} \right) \left(\frac{\alpha}{\rho C} \right) \delta e$$

D3.2 Modelo tridimensional

Para un modelo 3D el cual representa más fielmente una realidad física, cuando un pulso láser incide en una superficie, esfuerzos y tensiones con componentes paralelas a la superficie deben ser tomadas en cuenta. Así, componentes cortantes y compresivas son generadas dentro del sólido.

Con el propósito de calcular el campo de ondas elásticas generado por la fuente láser, es conveniente considerar la fuente como un centro de expansión o dilatación que toma lugar en un punto. Si el centro de expansión está enterrado dentro del material y se asume es isotrópico, ver figura A3, entonces es equivalente a la inserción de un volumen δV extra de material en un punto. Esto produce las siguientes tensiones localizadas.

$$\begin{aligned} \varepsilon_{11} = \varepsilon_{22} = \varepsilon_{33} &= \frac{1}{3} \frac{\delta V}{V} \\ &= \alpha \delta T \end{aligned}$$

Esto produce el mismo campo de esfuerzo localizado como una presión hidrostática. Así,

$$\begin{aligned} \sigma_{11} = \sigma_{22} = \sigma_{33} \\ &= \mathbf{B} \frac{\delta V}{V} \end{aligned}$$

Dónde $\mathbf{B} = \lambda + \frac{2}{3}\mu$ como antes.

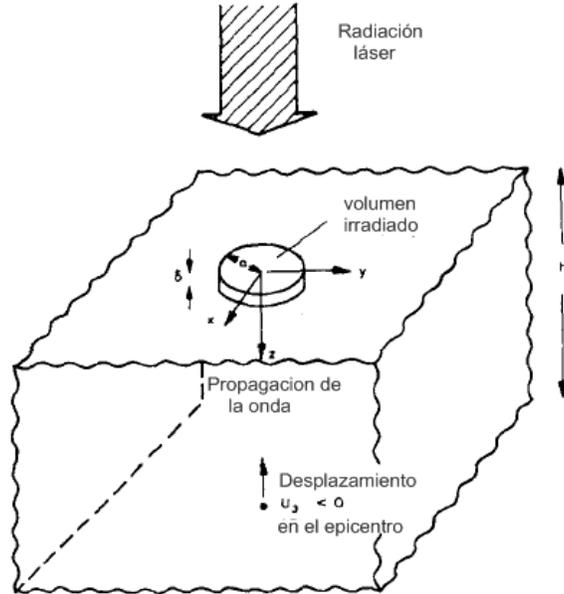


FIGURA A.1 *Expansión termoelástica tridimensional*

Así, el punto de expansión es equivalente a la repentina aparición de pares de fuerzas ortogonales iguales (llamadas fuerzas dipolares), la intensidad del dipolo esta dada por el producto de la magnitud de cada fuerza y la distancia de separación entre ellas, es decir el producto del esfuerzo y el volumen por lo tanto.

$$D_{11} = D_{22} = D_{33} = \mathbf{B}\delta V$$

Por lo tanto la relación de la magnitud del esfuerzo termoelástico producido por la potencia laser es la siguiente.

$$\frac{\delta V}{V} = 3\alpha\delta T = \frac{3\alpha\delta E}{\rho CV}$$

APÉNDICE D. HOJA DE ESPECIFICACIONES DEL LÁSER

COMPexPro

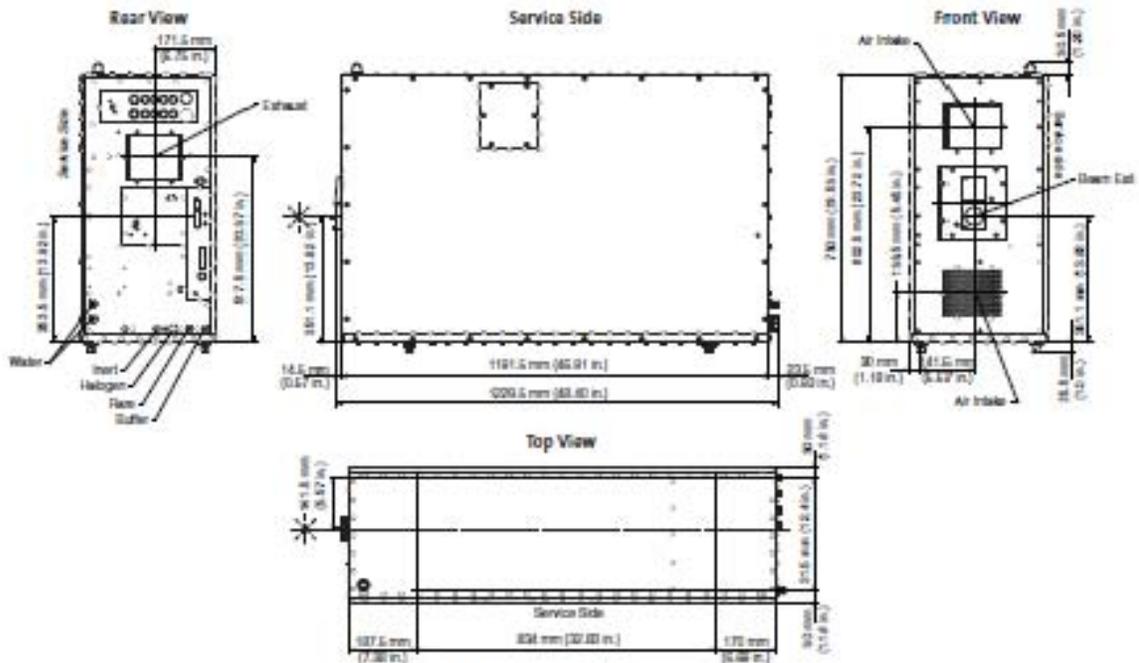
High-Pulse-Energy Excimer Lasers



Features

- Energy monitor with output stabilization
- Unique smooth ceramic preionization for unmatched pulse-to-pulse stability
- Advanced internal gas purification system for extended operation of laser gas and tube windows
- Single-phase operation
- NovaTube® metal-ceramic tube technology
- Magnetic-Assist (MA) protection for extended thyatron lifetime
- Small footprint
- Service access from one side
- Air-cooled versions

Mechanical Specifications



Superior Reliability & Performance

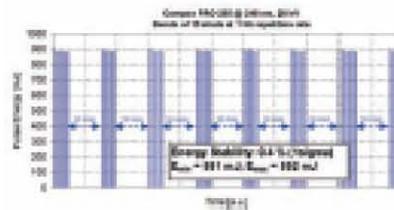
COMPexPro™

High-Pulse-Energy Excimer Lasers

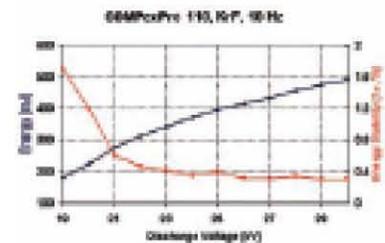
System Specifications¹

	Wavelength (nm)	COMPexPro	COMPexPro	COMPexPro	COMPexPro	COMPexPro
		50	102	110	201	205
Pulse Energy ² (mJ)	193	100	200	200	400	400
	248	150	400	400	700	700
	308	–	250	250	500	500
	352	–	200	200	300	300
Max. Rep. Rate ³ (Hz)		50	20	100	10	50
Average Power ⁴ (W)	193	4	4	10	4	15
	248	7	7	30	5	30
	308	–	5	16	3.5	20
	352	–	4	10	3	15
Energy Stability ⁵ (1 sigma) (%)		1	1	1	1	1
Pulse Duration ⁶ (ns)		20	20	20	25	25
Beam Dimensions ⁷ (V x H) (mm ²)		14 x 5	24 x 10	24 x 10	24 x 10	24 x 10
Beam Divergence ⁸ (V x H) (mrad ²)		2 x 1	3 x 1	3 x 1	3 x 1	3 x 1
Dimensions (L x W x H)		1282 x 375 x 793 mm ¹ (51 x 15 x 31 in. ¹)			1682 x 375 x 793 mm ¹ (67 x 15 x 31 in. ¹)	
Weight		275 kg (605 lbs.)			350 kg (772 lbs.)	
Electrical		230V, ±10%, 16A, 50/60 Hz switchable, 1-phase 115V, ±10%, 25A, 50/60 Hz switchable, 1-phase				
Water Cooling ⁹		2 to 3 l/min. (0.5 to 0.8 gal./min.), 15 to 20°C, connection: 1/2"				

- ¹ Measured at low repetition rate.
- ² Measured at max. repetition rate.
- ³ Typical FWHM.
- ⁴ Specified at 248 nm.
- ⁵ Only required above 20 Hz repetition rate.



Energy stability of COMPexPro 201 at 248 nm under typical PLD operating conditions



COMPexPro 110 pulse energy (blue) and output stability (red) over dynamic operating range

Coherent follows a policy of continuous product improvement. Specifications are subject to change without notice.

Coherent's scientific and industrial lasers are certified to comply with the Federal Acquisition Regulation (25 CFR 101.11.6) as administered by the Center for Devices and Radiological Health on all systems ordered for shipment after August 1, 2013.

Coherent offers a limited warranty for all Coherent® lasers. For full details of this warranty coverage, please refer to the service section at www.coherent.com or contact your local sales or service representative.

REFERENCIAS

1. Coffey, Valerie C., "How to select a power and energy meter", en *Laser Focus World*.
2. Lara, Héctor, "Navigating the features and limitations of laser power and energy meters", en *Laser Focus World*.
3. Satapathy, S. y V. K. Wadhawan, "Fabrication of pyroelectric laser-energy meters and their characterization using Nd:YAG laser of variable pulse-width", en *Sensors and Actuators*, núm. A121, 2005, págs. 576–583
4. Rosencwaig, A. y A. Gersho, "Theory of the photoacoustic effect with solids", en *J. Appl. Phys.*, vol.47, núm. 64, 1976
5. Jackson, W. y N. M. Amer, "Piezoelectric photoacoustic detection: theory and experiment", en *J. Appl. Phys.*, vol. 51, 1980, págs. 33-43
6. Farrow, Michael M., Burnham, Roger K., Auzanneau, Max, Olsen, Steven L., Purdie, Neil y Edward M. Eyring, "Piezoelectric detection of photoacoustic signals", en *Applied Optics*, vol. 17, núm. 7, 1978, págs. 1093-1098
7. Yong Zhang, Guo, Xiang Zhang, Peng, Rong Zheng, Hai, Yu Zhang, Xiang, Li Gao, Dang, Zhang, Hui, Pia, Li y Wing Kee Lee, "A novel time-integral type laser energy meter based on anisotropic Seebeck effect", en *Optics & Laser Technology*, vol. 40, 2008, págs. 844–849
8. Odon, Andrzej, "Processing of signal of pyroelectric sensor in laser energy meter", en *Science Review*, vol. 1, 2001, págs. 215-218
9. Krishnan, S., Bindra, K. S. y S. M. Oak, "A sensitive and high dynamic range cw laser power meter", en *Review of Scientific Instruments*, vol. 79, 2008, págs. 101-125
10. Jirmann, J., "A simple pyroelectric power meter for the FIR range", en *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, vol. 5, núm. 5, 1984
11. Satapathy, S. y V. K. Wadhawan, "Fabrication of pyroelectric laser-energy meters and their characterization using Nd:YAG laser of variable pulse-width", en *Sensors and Actuators*, vol. A121, 2005, págs. 576–583

12. Edwards, J. G. y R. Jefferies, "Power and energy monitor for pulsed lasers", en *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, vol. 4, pág. 580
13. Xiao-Chun, Huang, Xiao-Zhi, Guo y Yu-Xiang Weng, "A high performance pulse energy detector for Q-switched laser based on photoacoustic effect", en *Review of Scientific Instruments*, vol. 82, 2011, págs. 46-103
14. Satheeshkumar, M. K. y C. P. G. Vallabhan, "Use of a photoacoustic cell as a sensitive laser power meter", en *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, vol. 18, 1985
15. Raif, V. N., Thakur, S. N. y D. K. Rai, "A simple laser power meter dependent on photoacoustic effect", en *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, vol. 20, 1987, págs. 1472-1476
16. Peralta, S. B., Al-Khafaji, H. H. y A. W. Williams, "Photoacoustic optical power meter using piezoelectric detection", en *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, vol. 21, 1988, pág. 195
17. Bielecki, Z., Jach, K. y M. Nowakowski, "Investigations of a laser radiation energy meter with a photoacoustic converter", en *Opto-electronics Review*, vol.13, núm. 3, págs. 221-227
18. Duarte, M. y M. M. F. Vieira, "Laser power-meter employing neutral density filters", en *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 28, 1997, págs. 481-484
19. Da Silva, M. D., Bandeira, I. N. y I. C. M. Miranda, "Open-cell photoacoustic radiation detector", en *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, vol. 20, 1987, págs. 1476-1478
20. Tam, Andrew C., "Applications of photoacoustic sensing techniques", en *Review of Modern Physics*, vol. 58, núm. 2, 1986
21. White, R.M., Generation of elastic waves by transient surface heating, *J. Appl. Phys.*, 24, 3559–3567, 1963.
22. Theory and Applications of Laser Ultrasonic-Techniques, CRC Press 2003.
23. Scruby, C.B., Dewhurst, R.J., Hutchins, D., and Palmer, S., Quantitative studies of thermally-generated elastic wave in laser irradiated solids, *J. Appl. Phys.*, 51, 6210–6216, 1980.
24. Rose, L., Point-source representation for laser generated ultrasound, *J. Acoust. Soc. Am.*, 75, 723–732, 1984.
25. McDonald, F.A., Practical quantitative theory of photoacoustic pulse generation, *Appl. Phys. Lett.*, 54, 1504–1506, 1989.
26. Spicer, J., McKie, A.D.W., and Wagner, J.W., Quantitative theory for laser ultrasonic

waves in a thin plate, *Appl. Phys. Lett.*, 57, 1882–1884, 1990.

27. Arnau Vives, Antonio, *Piezoelectric Transducers and Applications*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2008
28. Texas Instruments, *Signal conditioning piezoelectric sensors*, applications report, SLOA033A, septiembre 2000
29. Tocho, Jorge O., Ramírez, Rafael y J. A. Gonzalo, “New technique for investigating ferroelectric phase transitions: the photoacoustic effect”, en *Appl. Phys. Lett.*, vol. 59, núm. 14, septiembre 1991