

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

ESCUELA DE CIENCIAS

ESTUDIO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ANÁLISIS PARA ESPECTROSCOPIA OPTOACÚSTICA

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE FÍSICO

CARLOS ALBERTO REINOSO JEREZ

DIRECTOR: CESAR COSTA VERA, Ph D.

Quito, Junio de 2007

DECLARACIÓN

Yo, Carlos Alberto Reinoso Jerez, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Carlos Alberto Reinoso Jerez

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Carlos Alberto Reinoso Jerez bajo mi supervisión.

César Costa Vera, Ph D.

Dedicatoria

A los seres más importantes de mi vida, mi querido padre Luis, mi tierna madre Herlinda y mi dulce hermana Mercedes, porque aquí verán reflejado, que el sueño de ser un científico se está cumpliendo.

Y a todas las personas que dedican su vida a descubrir y entender el universo con su belleza.

Agradecimiento

A Dios, por que con su infinita bendición, me colocó en el hogar ideal para que me forjase como un buen hijo, hermano y amigo.

A mis padres que por sus enseñanzas, sus valores, su esfuerzo y tenacidad porque me brindaron la educación más grande, constante y perdurable.

A mi Padre Luis Alberto por su inteligencia, su apoyo, su guía, su ejemplo y sobre todo por confiar en mí.

A mi Madre Herlinda por su ternura, su atención, su dedicación, su amor y por sus rezos pues me brindaban mucha fortaleza.

A mi hermana Mercedes por sus enseñanzas, su ejemplo, lucha y sensibilidad, que me otorgó el tener un contacto más cercano con los sentimientos puros y sinceros gracias a los consejos que necesitaba escuchar.

A mi familia entera, abuelitos y abuelitas, mis tíos, tías, primos, primas, por el cariño, amistad, comprensión y estima especial que siempre me han manifestado y por sus ejemplo ya que todos les admiro el seguir siempre adelante no importando las adversidades.

A mis primos, Victor, Jonathan, Fernando, Alejandro, Karly, Carolina, Andrés por brindarme su gran y sincera amistad, por haber compartido juntos muchas aventuras y millones de carcajadas.

A mis profesores por sus enseñanzas y demostrar que uno es producto de sus propios esfuerzos, por el dar valor a lo que uno quiere y a lo que uno se propone.

Por último quiero dar las gracias a todos aquellos que me han devuelto una sonrisa, a todos aquellos que me ofrecieron un pan en tiempos difíciles, a todos aquellos que han puesto de su parte para que el trajín diario sea más llevadero y muy en especial a la vida que, que como dijera Violeta Parra, me ha dado tanto.....

Reconocimiento

Quiero enfatizar mi reconocimiento hacia el Dr. César Costa Vera PhD, director de Tesis, por tener la paciencia ante mis dudas y por escuchar atentamente los problemas que a lo largo de esta Tesis surgieron. Gracias también al Dr. Cristian Santacruz PhD, quién colaboró al enseñarme el manejo de equipos. Dr. Edy Ayala PhD, por su ayuda prestada y disposición atenta a consultas. Un reconocimiento al IPPS de la Universidad de Uppsala, Uppsala Suecia por financiar algunos dispositivos necesarios para el desarrollo de este trabajo. Al Ing. Jaime Toledo por siempre estar pendiente de los avances de esta investigación con sus preguntas y preocupación. Al Dr. Alberto Celi PhD, quién proporcionó el sensor PZT utilizado en este trabajo.

A mis queridos amigos del Laboratorio, Yolanda, William, Esteban y Ronald, por siempre darme la facilidad en el uso de equipos y accesorios durante la construcción de ciertos dispositivos.

A mi cuñado José por poner a mi disposición equipos de medición y calibración así como su arsenal de libros de electrónica y haber compartido también horas de pruebas de los circuitos electrónicos construidos.

A mi hermana y mis padres por haber financiado muchos de los aparatos y gastos que se incurrieron en esta investigación.

ÍNDICE

CAPÍTULO I	1
-------------------------	----------

1.1	Introducción.	1
1.2	Objetivos de la Investigación.	3
1.2.1	Objetivo General.	3
1.2.2	Objetivos Específicos.	3
1.3	Hipótesis de trabajo.	4
1.4	Descripción del Trabajo	4
CAPITULO II		5
2.	Fundamento Teórico.	5
2.1	Radiación Electromagnética.	5
2.2	Interacción de la Radiación con la Materia.	6
2.2.1	Absorción de Radiación por Gases.	6
2.2.2	Ley de Beer-Lambert-Bouguer.	6
2.2.2.1.	<i>Limitaciones de la ley de Beer-Lambert-Bouguer.</i>	7
2.2.3	Absorción de Radiación por Sólidos y Líquidos.	7
2.3	El Láser.	8
2.3.1	Tipos de Láseres.	9
2.3.2	Láseres de Estado Sólido.	9
2.3.2.1.	<i>El Láser de Neodimio:YAG.</i>	9
2.3.3	Láseres Gaseosos.	10
2.3.3.1.	<i>El Láser de Helio-Neón.</i>	10
2.4	Usos de la Radiación Láser.	10
2.5	Energía, Potencia y Fluencia del Láser	11
2.6	Espectroscopía.	12
2.7	Acústica.	14
2.7.1	Naturaleza del Sonido.	14
2.7.2	Propagación del Sonido.	14
2.7.2.1.	<i>Medición de la intensidad. El decibelio.</i>	14
2.7.2.2.	<i>Forma de la onda sonora.</i>	15
2.7.3	Absorción de la Energía Sonora, Impedancia Acústica.	15
2.8	Generación del Pulso Optoacústico.	15
2.9	Propagación de una onda en sólidos no homogéneo.	20
2.9.1	Velocidad y Atenuación:	20

2.10	Registro de la Onda Optoacústica.	20
2.10.1	Transformadores Electroacústicos.....	21
2.10.2.	Micrófonos.	21
2.10.2.1.	<i>Micrófono de condensador.</i>	21
2.10.3	Transductores Piezoeléctricos.....	22
2.10.3.1.	<i>Funcionamiento.</i>	22
CAPÍTULO III	24
3	Metodología	24
3.1	Descripción del equipo experimental.....	24
3.2	Fuente Luminosa.....	25
3.2.1	Láser de Nd:YAG.....	25
3.3	Cámara de mediciones y monitoreo por video.	26
3.4	Sensores.....	27
3.4.1	Micrófono de Condensador de Electreto.....	27
3.4.2	Preamplificador para micrófono.	28
3.4.3	Transductor Piezoeléctrico PZT.....	28
3.4.4	Fuente de alimentación para el preamplificador.	28
3.4.5	Amplificador de Instrumentación para el micrófono AMPACR06.....	30
3.4.6	Osciloscopio Digital.....	31
3.4.7	Construcción de un soporte para el PZT.	32
3.4.8	Construcción de Celdas para muestras líquidas.....	33
3.5	Acoplante acústico.	33
3.6	Software de Procesamiento Microcal Origin Versión 6.0	34
3.7	Preparación de muestras.....	34
3.7.1	Metales	34
3.7.2	Piedra pómez.....	35
3.7.3	Muestras líquidas.....	36
3.8	Mediciones.	37
3.8.1	Metales.	37
3.8.2	Piedra pómez.....	38
3.8.3	Muestras líquidas.....	39
3.9	Error en la medición.	40

3.9	Láser Continuo de He-Ne.....	41
3.9.1	Amplificador Lock In.....	42
3.9.2	Construcción de una Choper para el láser He-Ne	42
3.9.3	Construcción de una cámara anecóica	43

CAPÍTULO IV

	45
4.1	Procesamiento de datos.	45
4.2	Metales	46
4.2.1	Cálculo de la Velocidad en los metales.	46
4.2.2	Atenuación en Metales	49
4.2.2.1	Cálculo de la Atenuación por ajuste exponencial.....	49
4.3	Piedra Pómez.....	51
4.3.1	Cálculo de la velocidad de la onda acústica en un medio poroso....	51
4.3.2	Cálculo de la Atenuación por ajuste exponencial en Piedra Pómez	54
4.4	Muestras líquidas.....	56
4.5	Porosidad	58
4.5.1	Cálculo de la porosidad mediante un método clásico.	58
4.6	Análisis de Resonancia de la onda acústica en el medio.....	60
4.7	Fuentes de error.	
	63

CAPÍTULO V.....65

5.1	Conclusiones.	65
5.2	Recomendaciones y Trabajos Futuros.....	65

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1. Dimensiones de las probetas de Aluminio y Acero	
34	

Tabla 3-2. Dimensiones de las probetas de Aluminio y Acero	
34	

Tabla 3-3 Dimensiones de las probetas de piedra pómez.	36
Tabla 3-4 Concentraciones de KMnO_4 en agua destilada.	36
Tabla 4-1 Cálculo de la velocidad del sonido en las probetas etálicas.....	48
Tabla 4-2, Datos tratados estadísticamente de los Coeficientes de atenuación de las muestras metálicas de Al, Fe y Acero.	50
Tabla 4-3 Velocidades encontradas para los distintos espesores y muestras de piedra pómez como resultado de un tratamiento estadístico.....	52
Tabla 4-4. Velocidades del sonido para diferentes tipos de piedra pómez.	53
Tabla 4-5 Datos tratados estadísticamente de los Coeficientes de atenuación de piedra pómez	55
Tabla 4-6. Datos de los impactos del láser en las muestras líquidas de diferentes concentraciones de KMnO_4	57
Tabla 4-7. Datos de los impactos del láser en las muestras de diferentes concentraciones de KMnO_4 , mostrando el pico de frecuencia y el área.	58
Tabla 4-8. Datos de las mediciones realizadas a las probetas de piedra pómez..	59
Tabla 4-9. Mediciones de Porosidad de rocas de Piedra pómez usando las recomendaciones clásicas según el ISRM.....	60
Tabla 4-10. Datos extrapolados para las probetas de pómez III y IV	60
Tabla 4-11, Longitudes de onda en su primer armónico, encontradas en la onda acústica para correlacionarla con la resonancia propia del material.....	62

Tabla 4-12, Longitudes de onda en su segundo armónico, encontradas 62
en la onda acústica para correlacionarla con la resonancia propia del material.

Tabla 4-13, Longitudes de onda en su quinto armónico, encontradas 63
en la onda acústica para correlacionarla con la resonancia propia del material.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Espectro electromagnético y sus aplicaciones. 5

Figura 2-2, Incidencia, paso y transmisión de un haz monocromático a través de una muestra. 7

Figura 2-3. Emisión espontánea 8

Figura 2-4 Emisión estimulada. 9

Figura 2-5. Representación de la potencia. 12

Figura 2-6 Dos estados de Energía de una molécula..... 13

Figura 2-7 Paso del haz láser por una muestra,..... 16

Figura 2-9, Generación de Voltaje por deformación de un piezoeléctrico. 22

Figura 2-10 a) Celda elemental piezoeléctrica;**b)** Elongación y contracción de un disco de PZT cuando se le aplica un..... 22

Figura. 3-1 Mesa de Trabajo..... 24

Figura 3-2. a) Integrated Cooler and Electronics (ICE), b) Láser Nd:YAG y c) cámara de medición. 25

Figura 3-3, Imagen del interior del láser y sus componentes..... 26

Figura 3-4 a) Cámara de medición. 26

Figura 3-5. Micrófono de electreto y su curva de calibración.	27
Figura 3-7 Preamplificador 1972-9600 de General Radio Corp.	28
Figura 3-8 Diagrama del circuito eléctrico de la fuente de poder.	29
Figura 3-9 Fuente de alimentación variable	29
Figura 3-10 Amplificador AMPACR06 ,	30
Figura 3-11. Diagrama del circuito Amplificador	31
Figura 3-12. Plano impreso del Amplificador de Instrumentación.	31
Figura 3-13, Osciloscopio Digital Tektronic TDS5052.	32
Figura 3-14. Soporte para PZT,	32
Figura 3-15. Celdas para muestras líquidas y sólidas	33
Figura 3-16 Probetas de Hierro, Aluminio y Acero	35
Figura 3-17 Preparación de probetas de piedra pómez.	35
Figura 3-18 Cuatro grupos de probetas de tipos diferentes de piedra pómez.	36
Figura 3-19. Muestras líquidas de $KMnO_4$, alcohol y glicerina.	37
Figura 3-20, Matriz de puntos objetivos del láser,	37

Figura 3-21 Espectros obtenidos de aluminio, hierro de la onda acústica registrada por el PZT.	38
Figura 3-22. Espectro optoacústico de una señal acústica en una probeta de piedra pómez, registrada con el PZT.	39
Figura 3-23. Esquema de enfoque del láser para muestras líquidas sobre una mesa de alineación óptica.	39
Figura 3-24 Espectro optoacústico de alcohol (H_3C-OH) y de una solución de permanganato de Potasio ($KMnO_4$) al 16%.	40
Figura 3-25. Matriz de los puntos de impacto en la superficie de una probeta de acero y de piedra pómez.	41
Figura 3-27, Imagen del panel frontal del Lock In SR810.	42
Figura 3-28. Choper.	43
Figura 3-29. Vista externa a) e interna b) de la cámara anecóica.	43
Figura 3-30. Materiales de diferentes impedancias acústicas usadas para aislar ruidos externos.	44
Figura 3-31. Sistema de alineamiento óptico dentro de la caja anecóica.	44
Figura 4-1a) Espectros optoacústicos registrado por el Osciloscopio Digital... ..	45
Figura 4-2. Espectro de Fourier de amplitudes y frecuencias de la onda acústica registrada por el PZT en una probeta de hierro.	46
Figura 4-3. Variación del tiempo entre el choque del pulso en la superficie de la muestra y el primer arribo de señal al sensor	47
Figura 4-4. Velocidades de la onda acústica en las probetas de Al para diferentes espesores.	48

Figura 4-5. Velocidades de la onda acústica en las probetas de Fe para diferentes espesores.	48
Figura 4-6. Velocidades de la onda acústica en las probetas de Acero para diferentes espesores.	49
Figura 4-7. Ajuste de la curva de atenuación de la onda acústica en su respectivo espectro acústico.	50
Figura 4-8, Coeficiente de Atenuación de la onda acústica en el Aluminio en función del espesor de las probetas en [mm].	51
Figura 4-9, Coeficiente de Atenuación de la onda acústica en el Hierro en función del espesor de las probetas en [mm].	51
Figura 4-10, Coeficiente de Atenuación de la onda acústica en el Acero, en función del espesor de las probetas en [mm].	51
Figura 4-11. Espectro optoacústico de la piedra pómez.	52
Figura 4-12. Velocidad de la onda acústica en las probetas de diferente espesor de piedra pómez I.	53
Figura 4-13. Valores de velocidad de la onda acústica de las cuatro muestras de piedra pómez.	54
Figura 4-14 Ajuste de la curva de decaimiento exponencial en un espectro de piedra pómez.	54
Figura 4-15, Coeficiente de Atenuación de la onda acústica en el Pómez I	55
Figura 4-16, Coeficiente de Atenuación de la onda acústica en el Pómez II.	55

Figura 4-17, Coeficiente de Atenuación de la onda acústica en el Pómez III.
55

Figura 4-18, Coeficiente de Atenuación de la onda acústica en el Pómez IV.
55

Figura 4-19. Espectro de la onda acústica en una muestra de Etanol al 70%. .. 56

Figura 4-20. Espectro de la onda acústica en una muestra de KMnO_4 al 16%. ...
56

Figura 4-21. Espectro de la onda acústica en una muestra de Glicerina.
57

Figura 4-22. Espectro de FFT de la onda acústica en una muestra de KMnO_4
58

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

RESUMEN

La presente investigación, describe el diseño, implementación, puesta a punto y pruebas de un sistema de medición optoacústico. Esta técnica es utilizada para la medición de la absorbancia de radiación electromagnética, por medio del análisis de la consecuente generación de ondas acústicas en los materiales bajo exposición. Se utilizó un láser pulsado de Nd:YAG para generar los pulsos láser en una cámara especial. Se irradiaron muestras sólidas de aluminio, hierro, acero en diferentes tamaños, y cuatro muestras diferentes de piedra pómez; éstas últimas de interés para la vulcanología y también para la industria petrolera. Todas estas probetas fueron cilíndricas y de distintos espesores, con superficies preparadas para recibir el impacto del láser y también estar en contacto con el sensor. Usando un transductor piezoeléctrico, se convierte la señal acústica que atraviesa el medio, en una señal eléctrica. Esta señal fue tratada, amplificada y llevada a un osciloscopio digital, donde se almacenó y, posteriormente, con ayuda de una PC, se procesó. Mediante el análisis de la señal eléctrica generada por el sensor, se logró encontrar algunas características inherentes a cada material bajo estudio, como son la velocidad de la onda acústica en el medio, sus respectivos coeficientes de atenuación acústica, y una tendencia del comportamiento poroso de la piedra pómez. Los espectros obtenidos para diferentes muestras mostraron a simple vista diferencias cualitativas como amplitud, formas de las envolventes, etc. Esto puede usarse potencialmente para identificación del material, si se logra construir una librería espectral adecuada. Para alcanzar estos resultados fue necesario, el diseño y construcción de cámaras de aislamiento acústico, instrumentos, circuitos amplificadores y de procesamiento de señal, además de sistemas de alineación óptica. Se utilizó métodos y técnicas, para de manera sistemática y bajo un riguroso tratamiento estadístico, llegar a obtener resultados confiables. Las mediciones en general estuvieron sujetas a varias fuentes de error de las que se puede destacar la importancia de un buen acoplamiento muestra – sensor. La fluencia láser tampoco pudo ser controlada eficientemente, debido a la dificultad en el control de las variaciones de espesor en las probetas bajo análisis. En conclusión, la investigación presenta resultados que demuestran, que el uso de esta técnica es apropiada para el análisis de materiales y su caracterización, también propone futuras aplicaciones y diversificación en los campos de la espectroscopia.

CAPÍTULO I

Introducción.

La espectroscopía optoacústica pertenece a una clase de técnicas espectroscópicas de alta sensibilidad utilizadas para la medida de la absorbancia, así como las propiedades termo-ópticas de diferentes tipos de materiales. Además el estudio de la señal optoacústica nos permite cuando es necesario, hacer la descripción del viaje de la onda ultrasónica dentro de una muestra. Tales técnicas tienen como base el análisis del aumento rápido de la temperatura de la muestra inducida por la absorción de luz en el medio material y sus efectos subsecuentes [1]. A más de la generación de calor se producen otros cambios en las propiedades de la muestra, que conllevan aplicaciones prácticas de análisis. Entre estos, está la dilatación volumétrica local, que implica una consecuente variación en la presión dentro del medio, que resulta finalmente en la propagación de una onda acústica a través del medio o simplemente en la emisión de sonido desde el cuerpo bajo análisis hacia el exterior [2].

En 1880, Alexander Graham Bell descubrió que el selenio y otros sólidos, colocados en forma de un diafragma en el extremo de un tubo, producían un sonido audible cuando eran iluminados por la luz solar modulada. Graham Bell atribuyó correctamente tal fenómeno al proceso de absorción de la luz que realizaba el material y provocaba su dilatación térmica. Sucesivas dilataciones producían vibraciones dentro del tubo, generando sonido. Con este experimento, además de mostrar que es posible “oir” a la luz del sol, Graham Bell estableció la base para la actual espectroscopía optoacústica [10]. Las limitaciones prácticas de la época hicieron que este efecto fuera considerado como una simple curiosidad científica, solamente redescubierta cerca de 100 años más tarde. Los trabajos iniciales sobre este efecto en sólidos, publicados en los años 70, formaron la base teórica y experimental que dio inicio al rápido desarrollo y a nuevas aplicaciones de la espectroscopía optoacústica [10]. Esto llevó a la invención de otros esquemas de detección del efecto, los cuales hoy se integran en lo que se llama de manera más general la espectroscopía fototérmica [11].

Hasta la segunda mitad del siglo veinte, la estructura de una sustancia, se determinaba usando información obtenida a partir de reacciones químicas (el descubrimiento de un nuevo producto natural, por ejemplo). Esta información incluía la identificación de grupos funcionales por pruebas químicas, con resultados de experimentos en los cuales las sustancias fueron divididas o separadas en más pequeñas, en fragmentos más legibles e identificables [4].

Pruebas cualitativas y de degradación química fueron a la larga remplazadas en cierto grado por métodos instrumentales de determinación de la estructura. Estos nuevos métodos se han basado en una más profunda y precisa comprensión de la naturaleza atómica y molecular debida a los avances de la física que han estado ocurriendo de manera acelerada desde finales del siglo XIX [4]. Los más prominentes métodos que proveen de pistas estructurales, en este contexto: la Resonancia Magnética Nuclear (NMR), que nos dice acerca del esqueleto de las cadenas de carbonos y sus vecindades de hidrógenos asignados a él, la Espectroscopía Infrarroja (IR), que revela la presencia o ausencia de grupos funcionales y la Espectroscopía Ultravioleta-Visible (UV-VIS), que prueba la distribución electrónica, especialmente en moléculas con sistemas *pi* electrón conjugados, donde estas dos últimas usan a la luz como su herramienta fundamental [21]. Finalmente, tenemos la Espectrometría de Masas (MS), que proporciona el peso molecular y la fórmula, de la propia molécula y/o de sus partes concebidas como unidades estructurales [18]. La Espectroscopía Optoacústica es una forma de espectroscopia basada en la luz VIS, UV o IR, en la que este trabajo se concentra.

El presente proyecto se ha realizado con el objetivo de desarrollar una línea de investigación en espectroscopía optoacústica, que permitía la aplicación de esta técnica en muchas situaciones de interés práctico en nuestro medio. Una posibilidad cierta de aplicación, es el estudio de rocas y otros materiales porosos, de interés para la industria petrolera y las ciencias geofísicas en general. Con la técnica optoacústica es posible determinar la porosidad de diferentes tipos de rocas. Esta propiedad del material pétreo se relaciona con las propiedades de yacimientos petroleros, por ejemplo [8], o, en el caso de material volcánico, puede revelar importante información acerca del tipo de erupción que ha producido el

tipo de roca particular bajo análisis. También es posible con esta técnica, establecer niveles de contaminación en procesos productivos de la industria metalúrgica. La señal optoacústica es diferente cuando se comparan preparados con superficies relativamente limpias, con muestras contaminadas. Esto es de gran importancia en la fabricación del acero [9].

Otras aplicaciones posibles tienen que ver con el monitoreo en tiempo real de cambios estructurales en las propiedades físicas de diferentes tipos de materiales, por ejemplo cambios de fase. En este caso, debido a que el cambio de fase provoca modificaciones fundamentales en la estructura de un material dado, la generación y propagación de la onda acústica resultante cambiará radicalmente [22].

En el área de la medicina también encontramos aplicaciones interesantes, como por ejemplo, en la medición de la concentración de eritrocitos (glóbulos rojos), así como de los linfocitos (glóbulos blancos), vitales al momento del diagnóstico y administración de medicamentos [20].

En general, la sensibilidad reportada que posee esta técnica y a la posibilidad de diversificar sus aplicaciones, hacen de ésta una buena alternativa para el estudio de interfaces o superficies [10].

Objetivos de la Investigación.

Objetivo General.

Implementar un sistema de análisis para materiales sólidos y líquidos basado en la técnica de espectroscopía optoacústica.

Objetivos Específicos.

1. Estudiar los fundamentos teóricos de la espectroscopía optoacústica en materiales sólidos y líquidos.
2. Diseñar, ensamblar, y operar un sistema de análisis espectroscópico, utilizando la técnica optoacústica.
3. Analizar el espectro o señal optoacústica de absorción láser relacionado con la constante de absorción optoacústica en materiales sólidos y líquidos.

4. Estudiar los espectros obtenidos en las mediciones de materiales conocidos, correlacionarlos con parámetros físicos de materiales sólidos y líquidos.
5. Observar la influencia de los parámetros de absorción óptica y expansión isobárica en la señal optoacústica de materiales sólidos y líquidos.

Hipótesis de trabajo.

Con el diseño y ensamblaje de un sistema de análisis espectroscópico utilizando la técnica optoacústica se podrá determinar las características de materiales sólidos y líquidos.

Descripción del Trabajo

El presente trabajo se ha organizado de la siguiente manera. La teoría de los fenómenos físicos presentes, sustentada en un análisis bibliográfico, se describe en el **Capítulo II**. La selección de sensores, diseño y construcción de dispositivos electrónicos de amplificación, y el tratamiento de la señal, preparación de muestras y toma de datos. El diseño del experimento y el método de investigación incluyendo la toma de muestras y su preparación, la metodología de reducción de errores. y la obtención de datos para las medidas de porosidad, atenuación de onda y velocidad de propagación, tanto con el método optoacústico como con un método clásico se detalla en el **Capítulo III**.

En el **Capítulo IV**. se hace el análisis de los datos obtenidos, su procesamiento, y se discute las correlaciones entre los resultados obtenidos y las propiedades físicas relevantes, También se discute la fuente de posibles errores experimentales.

Finalmente, las conclusiones y recomendaciones se presentarán en el **Capítulo V**.

Las referencia bibliográficas se las encontrarán al final de los capítulos, fotografías, espectros importantes y planos de construcción estarán disponibles en los anexos.

CAPITULO II

2. *Fundamento Teórico.*

En este capítulo se discutirán algunos conceptos físicos, que permitirán entender el marco teórico de este trabajo.

2.1 *Radiación Electromagnética.*

La radiación electromagnética es una combinación de campos eléctricos y magnéticos oscilantes, perpendiculares entre sí, que viajan a través del espacio, transportando energía de un lugar a otro, sin necesidad de un medio material para propagarse [15].

La radiación electromagnética también se puede considerar, en lugar de una serie ondas, como un chorro de partículas, llamadas fotones. Esta dualidad onda-partícula hace que cada fotón tenga una energía E proporcional a la frecuencia ν de la onda asociada, dada por la relación, que en 1900, el físico alemán Max Planck propuso: $E = h\nu$, donde, h es la constante llamada constante de Planck [16].

El rango de las energías de los fotones se llama espectro electromagnético y se muestra en *Figura 2-1*. Este espectro corresponde a diferentes longitudes de onda λ , que están relacionadas con la frecuencia por $\nu\lambda = c$ donde c es la velocidad de la luz en el vacío.

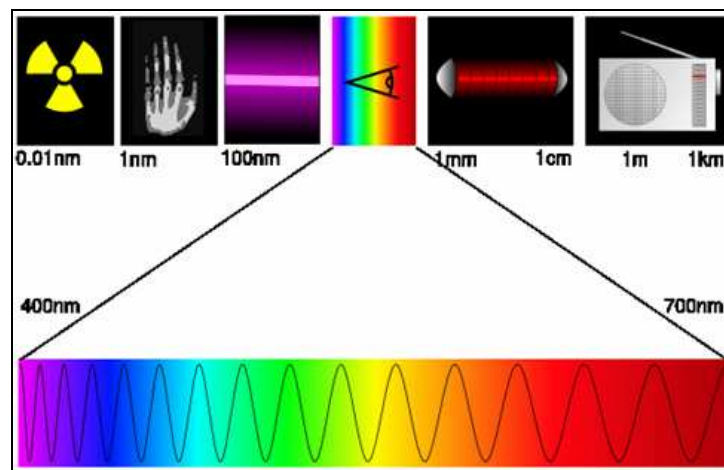


Figura 2-1 Espectro electromagnético y sus aplicaciones. Podemos ver que el espectro visible se encuentra entre 400nm a 700nm [Gráfico tomado de Wikipedia [14]]

Para el presente trabajo el espectro relevante está comprendido entre las longitudes de onda que van desde el UV cercano (aproximadamente 337nm) hasta el NIR (1,06 μm), pasando por el visible (VIS: 400nm-700nm).

2.2 Interacción de la Radiación con la Materia.

2.2.1 Absorción de Radiación por Gases.

Los átomos o moléculas en un gas, portan una cierta cantidad de energía, la cual consiste parcialmente de una energía cinética (traslacional), y una energía interna (vibracional, rotacional o electrónica) [3]. Un fotón puede ser absorbido por una molécula, excitando el nivel de uno de los estados energéticos internos. Por otro lado, una molécula excitada de alguna manera, normalmente libera de forma espontánea (emite) fotones para regresar a un estado estable de menor energía [1].

Los postulados de la mecánica cuántica indican que solo un número finito y discreto de niveles de energía son posibles en un átomo o molécula. Por lo tanto, cambiar la energía interna de un gas molecular equivale a destruir o generar fotones con distintos niveles de energía o frecuencia ν , y consecuentemente, con diferentes frecuencias o longitudes de onda [1].

2.2.2 Ley de Beer-Lambert-Bouguer.

Típicamente, una onda electromagnética, que penetra en un medio homogéneo no excitado se atenúa gradualmente por absorción, siguiendo un decaimiento exponencial. Esta atenuación corresponde a una probabilidad de absorción de los fotones, proporcional al camino lineal que estos tienen que atravesar en el medio. La expresión matemática de este fenómeno se conoce como *ley de Beer-Lambert-Bouguer* [5], y se puede expresar como:

$$E_{abs} = E_o(1 - e^{-\alpha.k.l}) \quad \text{Ec. 2-1}$$

Donde, E_o es la intensidad de luz (equivalente al número de fotones por unidad de tiempo y área) incidente sobre la superficie iluminada del medio, α es

el coeficiente de absorción del medio, l es la profundidad dentro del medio absorbente y k es la concentración de sustancia absorbente en el medio. La atenuación de un haz luminoso se ilustra en la *Figura 2-2*.

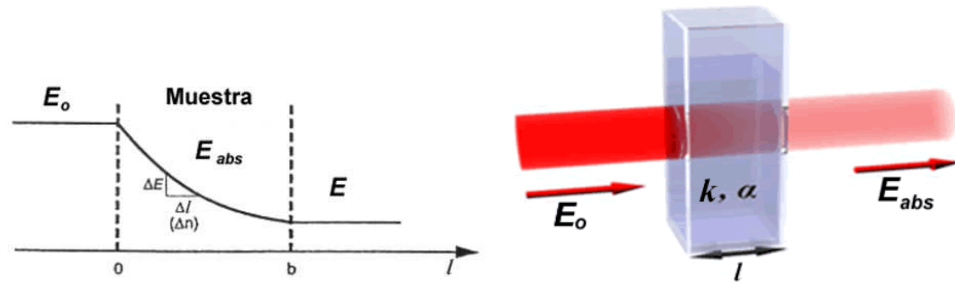


Figura 2-2. Incidencia, paso y transmisión de un haz monocromático a través de una muestra. E_0 es la intensidad de luz incidente, α el coeficiente de absorción, l es la profundidad dentro del medio absorbente, y k la concentración de la sustancia absorbente en el medio.

2.2.2.1. Limitaciones de la ley de Beer-Lambert-Bouguer.

La aplicabilidad de la ley de Beer-Lambert-Bouguer está limitada por factores como:

- Desviaciones de los coeficientes de absorbancia a altas concentraciones (>0.01M) debido a las interacciones electrostáticas entre las moléculas por la proximidad.
- Dispersión de la luz debido a las partículas de la muestra.
- Fluorescencia o fosforescencia de la muestra.
- Cambios en el índice de refracción debido a altas concentraciones o a gradientes de temperatura.
- Cambios en el equilibrio químico como función de la concentración.
- Alta intensidad de la radiación incidente (efectos no lineales) [25].

2.2.3 Absorción de Radiación por Sólidos y Líquidos.

A más de la absorción y emisión específicas (resonantes) de fotones en líquidos y sólidos por las moléculas y átomos, la interacción con electrones libres es una fuente adicional de absorción y emisión no específica. Adicionalmente, en los sólidos se pueden excitar vibraciones de la red cristalina (fonones) típicamente como un efecto secundario [1].

2.3 El Láser.

El láser es un tipo de radiación electromagnética coherente, producida en un medio activo, que puede ser líquido, sólido o gaseoso, excitado convenientemente y confinado en una cavidad resonante. La radiación coherente se obtiene mediante la amplificación de luz debida al proceso de emisión estimulada de radiación [24].

Al excitar electrónicamente un átomo, uno de sus electrones absorbe la energía de excitación y pasa de su órbita estacionaria estable de energía E_1 , a otra superior o excitada E_2 ; pero un electrón excitado tiende a volver a su estado estable, cosa que puede ocurrir por radiación del exceso de energía que había adquirido en estricto cumplimiento de la relación de Bohr (Ec. 2-2).

$$E_2 - E_1 = h\nu_{21} \quad \text{Ec. 2-2}$$

La *Figura 2-3* ilustra este proceso. Esta forma de emisión de la radiación fue denominada por Albert Einstein como “*emisión espontánea*”.

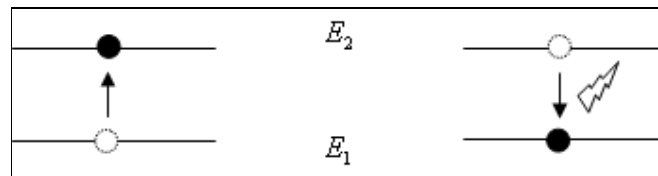


Figura 2-3. Emisión espontánea, a) Paso del estado estable al excitado, b) Paso del estado excitado al estable emitiendo un fotón, (adaptado de [46]).

Sin embargo, también puede ocurrir que la radiación emitida espontáneamente por un átomo alcance a otro átomo excitado de la misma especie, uno de cuyos electrones se encuentra en el estado de energía excitado E_2 . En tales condiciones, Einstein postuló que se produce la emisión de radiación del segundo átomo por efecto de la interacción de éste con la radiación emitida por el primero, tal como muestra la *Figura 2-4*. Este tipo de emisión de radiación la denominó Einstein “*estimulada*” o “*inducida*”.

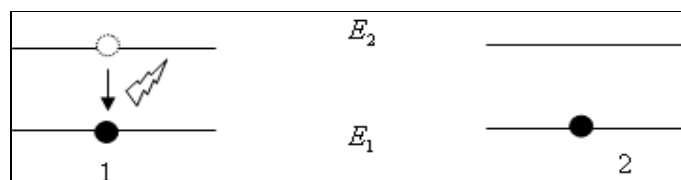


Figura 2-4. Emisión estimulada

También se cumple en este caso la relación de Bohr, de modo que la frecuencia de la radiación emitida es exactamente igual a la frecuencia de la radiación estimulante [12]. En esta acción radica el efecto llamado amplificación de la radiación. El efecto de interacción de la radiación emitida por el primer átomo con otros átomos excitados provoca una amplificación, esto llevará a una duplicación de la intensidad de la radiación. Esta brevísima descripción justifica el nombre LASER, siglas de la expresión inglesa “*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*” (amplificación de la luz mediante la emisión estimulada de radiación) [12], que describe éste proceso físico.

2.3.1 Tipos de Láseres.

Dependiendo del medio activo que usan, se pueden diferenciar entre láseres de estado líquido, sólido o gaseosos, (adicionalmente, se puede considerar por separado los láseres de semiconductores). Los tipos de materiales usados son muy variados, por ello nos concentraremos en los que son de mayor interés para este trabajo, como son el láser de Nd:YAG y el de He-Ne.

2.3.2 Láseres de Estado Sólido.

Láseres de estado sólido populares, son aquellos usan como medio óptico barras de cristal de rubí, o vidrios y cristales con impurezas de Neodimio. Los láseres de estado sólido proporcionan emisiones de gran intensidad. Pueden funcionar por pulsos, generando un destello de luz durante un tiempo muy breve, o de manera continua. El bombeo se realiza mediante el destello luminoso de tubos de gases nobles, lámparas de arco, lámparas de vapor metálico, arreglos de diodos, etc. Este destello excita el medio activo y se produce la emisión estimulada [26].

2.3.2.1 El Láser de Neodimio:YAG.

Por el destello de una lámpara llena con un gas noble (Kr por ejemplo) cerca de un barra de Nd:YAG, parte de esta radiación de amplio espectro es absorbida por la barra y almacenada momentáneamente en un estado excitado del ión de

Neodimio. Este estado excitado (meta-estable) tiene una vida media de alrededor de 250 microsegundos.

Un pulso gigantesco de energía se forma, controlando la emisión estimulada de la radiación por medio del llamado Q-switch. Este permite almacenar la radiación estimulada por un instante hasta que se emita el pulso láser con la intensidad deseada. El láser genera fotones infrarrojos, esencialmente idénticos en fase. El rayo láser es sumamente direccional, espectralmente puro y coherente. Estas propiedades, colectivamente, hacen de este láser, una fuente de radiación extraordinaria [26].

2.3.3 Láseres Gaseosos.

Este tipo de láseres pueden usar un gas puro, una mezcla de gases o incluso un vapor metálico, contenidos en un tubo cilíndrico de vidrio o cuarzo. En los extremos del tubo se sitúan dos espejos para formar una cavidad resonante. Estos tipos de láseres generalmente son bombeados por luz ultravioleta, haces de electrones, corrientes eléctricas o reacciones químicas [12].

2.3.3.1. *El Láser de Helio-Neón.*

En el láser de Helio-Neón (He-Ne) el medio activo es el Neón, y al Helio le corresponde transferir selectivamente la excitación a los niveles de energía del Neón. La mezcla de los dos gases en una descarga eléctrica provoca la excitación y la superpoblación de los niveles del Neón. La excitación por impacto electrónico de los átomos de Helio o Neón produce la emisión espontánea en las diferentes transiciones de ambos átomos. El láser de helio-neón es muy importante por su elevada estabilidad de frecuencia, pureza de color y mínima dispersión del haz [12].

2.4 Usos de la Radiación Láser.

Existe un gran número de modelos que describen el fenómeno de interacción láser-sólido, láser-líquido, y láser-gas. Estos están basados en un proceso térmico: calentamiento del sólido, seguido por la fundición y evaporación. Esta es básicamente una descripción de esta interacción en una escala macroscópica, dentro de la cuál se desarrollan estos fenómenos [4].

En metales, la luz es absorbida por una interacción con los electrones. Un fotón es absorbido por un electrón, el cual incrementa su energía pasando a un estado de energía más alta, también puede causar su salto a la banda de conducción. Los electrones excitados colisionan con los fonones de la red, por lo tanto transfieren la energía absorbida a la red [17].

2.5 Energía, Potencia y Fluencia del Láser

El análisis de los resultados que se obtengan al realizar los tratamientos y su correlación con los parámetros del proceso, requieren un conocimiento detallado de las características físicas del haz láser, como son la potencia radiante suministrada, la duración de los pulsos, así como la distribución espacial del haz y la fluencia.

En el modo pulsado la potencia varía con el tiempo en forma de pulsos de duración determinada y frecuencia de repetición establecida (*Figura 2-5*). En este caso, el cálculo de la potencia media se efectúa en un intervalo de tiempo $t = T$, que es el periodo entre pulsos (inverso de la frecuencia de repetición, $1/\nu$). Si (τ) representa la duración del pulso, forzosamente menor que el periodo entre pulsos, el cálculo de la energía total emitida por un pulso se limita a la integración temporal de su potencia instantánea a lo largo de un periodo (*Figura 2-5*) [51],

$$E_p = \int_0^T P(t)dt = \int_0^{\tau} P(t)dt \quad \text{Ec. 2-3}$$

Por tanto, se deduce que, en modo pulsado, la potencia media es

$$P_m = \frac{1}{T} E_p = \nu E_p \quad \text{Ec. 2-4}$$

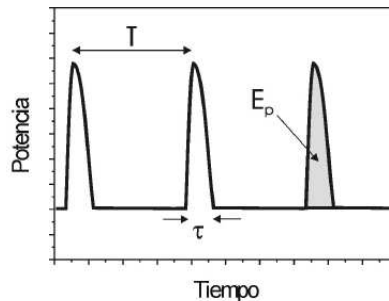


Figura 2-5. Representación de la potencia

instantánea en modo pulsado. T es el periodo entre pulsos, (τ) la duración y E_p la energía de los pulsos.

A efectos prácticos se define la potencia de pulso como,

$$P_p = \frac{E_p}{\tau} \quad \text{Ec 2-5}$$

Los efectos producidos al irradiar un material cualquiera dependen en gran medida del área en el que se concentra el flujo de radiación. Por este motivo se definen dos magnitudes físicas muy importantes: la fluencia de los pulsos láser (F) , que es la energía por unidad de área irradiada con cada pulso; y la intensidad (o densidad de potencia) de los pulsos (I) , que es la energía por unidad de área y tiempo suministrada con cada pulso,

$$F = \frac{E_p}{S} \quad \text{Ec. 2-6}$$

$$I = \frac{E_p}{\tau \cdot S} = \frac{P_p}{S} = \frac{F}{\tau} \quad \text{Ec. 2-7}$$

en donde S es el área irradiada por el haz [51].

2.6 Espectroscopía.

El requisito más importante que determina la absorción de un fotón por una molécula, es, que la energía del fotón deberá ser igual a la diferencia de energías entre dos estados. Estos estados pueden ser cosas como dos estados de espines nucleares, dos estados vibracionales, o dos estados electrónicos. Este proceso, regulado por la relación de Bohr (Ec. 2-2), es conocido como *absorción resonante* [4]. Donde nuevamente tenemos el caso de la diferencia de energías. En espectroscopía por resonancia magnética nuclear (NMR) hay dos estados de espines de un núcleo atómico, en espectroscopía infrarroja (IR), se tiene dos estados diferentes de energía vibracional, y en espectroscopía ultravioleta-visible (UV-VIS), hay dos estados de energías electrónicas [4].

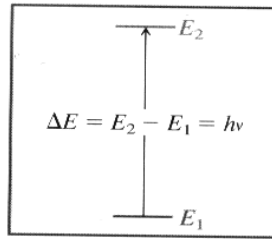


Figura 2-6 Dos estados de Energía de una molécula, Absorción de energía igual a $E_2 - E_1$ excitando a una molécula desde su estado de energía base a su siguiente más alto [4].

Más moléculas existen en el nivel de energía E_1 , que en el estado alto de energía E_2 . La excitación de una molécula, desde el estado energético bajo al alto, requiere la adición de un incremento de energía igual a ΔE . Entonces, cuando la radiación electromagnética incide sobre una molécula, solo la frecuencia cuya energía correspondiente es igual a ΔE es absorbida. Todas las otras frecuencias son transmitidas [4].

Los espectrómetros son instrumentos diseñados para medir la distribución en frecuencias o longitudes de onda de campos de radiación electromagnética, con el fin de caracterizar su 'espectro' energético. Una aplicación típica es la determinación del efecto de la absorción por una sustancia sobre el espectro de una fuente determinada (en un espectrofotómetro). Básicamente, un espectrofotómetro consiste de una fuente de radiación, un compartimiento que contenga la muestra a través de la cual pasará la radiación, y un detector. La presencia de un elemento dispersor en el camino óptico es muy importante para dispersar la radiación incidente en términos de su frecuencia. Este elemento puede ir luego de la fuente, o antes de la detección. Para una frecuencia a la que la muestra absorbe la radiación, el detector medirá un decremento en la intensidad. En las regiones espectrales de transparencia de la muestra la intensidad no disminuirá significativamente. La relación entre la frecuencia y la absorción en un gráfico X-Y se llama *espectro* de absorción. Típicamente, para muestras gaseosas, un espectro consiste de una serie de picos, en frecuencias particulares cuya interpretación puede proveernos de información estructural de la muestra.

2.7 Acústica.

2.7.1 Naturaleza del Sonido.

El sonido es el resultado de una perturbación que se propaga en un medio elástico. El exceso de presión característico de la perturbación descrita, se denomina presión sonora. Este tipo de movimiento en el cual, no es el medio en si mismo, sino alguna perturbación lo que se desplaza, se denomina onda. Cuando la onda tiene lugar en un medio material, sea líquido, sólido o gaseoso se denomina onda acústica [13].

Las ondas acústicas viajan habitualmente a velocidad constante, que depende de las condiciones ambientales tales como la temperatura pero principalmente de las características del medio.

2.7.2 Propagación del Sonido.

El sonido se propaga por medio de oscilaciones longitudinales de las partículas del medio; es decir, que las partículas se mueven en la misma dirección en que se propaga el movimiento. Se ve así que el movimiento consiste en una condensación y un enrarecimiento de la materia en que las partículas se van acercando y después se alejan entre si. La distancia entre las compresiones o rarefacciones, o entre dos puntos correspondientes de dos ondas sucesivas, se conoce como longitud de onda y se designa por λ [13]. Características adicionales del sonido son la *frecuencia V* (relacionada con la λ por $V = v\lambda$), *la intensidad y la forma* [13].

2.7.2.1. Medición de la intensidad. El decibelio.

La intensidad, se refiere a la energía transportada por la onda en el material por el cual viaja. En un mismo medio, se considerarán como ondas de una misma intensidad, las que tienen el mismo valor eficaz para la sobrepresión, ya que tendrán la misma densidad energética. La intensidad puede medirse en belios, sobre un nivel de referencia de $10^{-16} \frac{\text{wattios}}{\text{cm}^2}$.

Un decibelio representa una variación relativa del 26% de la energía de la onda sonora. Si la intensidad de un sonido es 100 veces mayor que la de otro, se puede decir que el primero es 2 belios o 20 decibelios más intenso que el segundo [13].

2.7.2.2. Forma de la onda sonora.

La forma de una onda sonora depende de los valores instantáneos por los que va pasando la presión oscilatoria. Según el teorema de Fourier, puede determinarse por el conjunto de oscilaciones sinusoidales elementales en las que puede descomponerse y por la amplitud de estas oscilaciones [13].

Fuera de interferencia, la intensidad de una onda no sinusoidal será igual a la suma de las intensidades de los sonidos sinusoidales que la componen [27].

2.7.3 Absorción de la Energía Sonora, Impedancia Acústica.

La producción del sonido requiere el consumo de una determinada cantidad de energía para generar un estado vibratorio. Si imaginamos una fuente sonora en el aire, de modo que el sonido pueda propagarse en todas las direcciones sin ninguna dificultad, se intuye que la energía se difunde, según una superficie cada vez más grande y equivalente en todas direcciones. Esta misma energía puede ser absorbida por materiales en el medio de propagación que toman esta energía vibratoria del medio y lo convierten en energía mecánica que termina convirtiéndose en calor [13].

2.7.3.1 Coeficiente de Absorción Acústica.

El coeficiente de absorción acústica es el porcentaje de energía absorbida por la unidad de superficie, tomando como absorción máxima (100%) la de un área abierta de superficie unidad. Este coeficiente es una propiedad intrínseca de los materiales y las estructuras. O sea que, una ventana de superficie unidad tiene por coeficiente de absorción la unidad y un material que absorba en las mismas condiciones debe estar normalizado respecto a esa área [13].

2.8 Generación del Pulso Optoacústico.

Desde las contribuciones realizadas por Patel and Tam [2], se conoce que la espectroscopía optoacústica tiene como base el análisis del aumento rápido de

la temperatura de una muestra inducida por la absorción de luz por un medio y sus efectos subsecuentes [1]. Entre estos está la dilatación volumétrica local, que implica una consecuente variación en la presión dentro del medio, lo que resulta finalmente en la propagación de una onda acústica a través de éste, o simplemente en la emisión de sonido desde el cuerpo bajo análisis hacia el exterior. El análisis físico de esta onda acústica es la base de la espectroscopía optoacústica [2].

La generación de una señal optoacústica se debe a la conversión de la radiación absorbida de manera óptica, en una señal acústica (vibraciones) a través, de procesos de relajación no radiativos. Usualmente, estos procesos involucran la generación de calor en la muestra, y sus consiguientes expansiones térmicas.

Consideramos el paso de un haz láser a través de una muestra líquida por ejemplo. Este haz iluminará a su paso parte de la muestra formando un cilindro, como se muestra en la *Figura 2-7*.

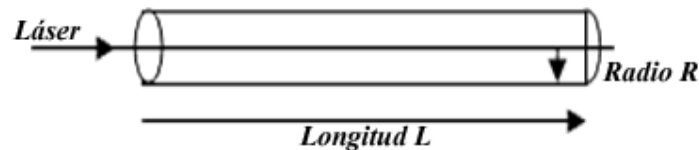


Figura 2-7 Paso del haz láser por una muestra, formando un cilindro iluminado de radio R y longitud L .

Para el caso de un láser pulsado, definiremos un Tiempo τ_p que será la duración del pulso láser y una frecuencia f de repetición del pulso, y asumiremos que la longitud del pulso es más grande que el tiempo de la relajación no radiativa τ_{NR} . El término τ_a , es el tiempo que le toma al pulso acústico atravesar la región iluminada de manera perpendicular a la dirección del haz láser [2], en un medio de sección transversal finita.

Dividiendo la distancia desde un punto del medio (la superficie expuesta, por ejemplo) hasta un detector para el tiempo de viaje de la onda acústica generada por el pulso del láser, obtenemos la velocidad de la onda acústica en el medio. Esta velocidad debe ser claramente una función del tipo de material, de su

estructura y estado, pero no de su geometría. Este parámetro será uno de los objetivos experimentales en nuestro trabajo. Podemos plantear la relación:

$$\tau_a = \frac{2R}{v_a} \quad \text{Ec. 2-8}$$

Dónde v_a es la velocidad acústica en el medio, y R es radio del cilindro iluminado por el paso del haz láser.

Adicionalmente, considerando la rapidez de respuesta del detector de sonido, en la discusión que sigue, asumiremos que el pulso láser es mucho más largo que este tiempo de respuesta (en nuestro caso, un transductor piezoeléctrico) $\tau_p \gg \tau_{pzt}$.

La intensidad de la señal optoacústica dependerá de la energía absorbida por el medio, que en este caso esta dada por la ley de Beer-Lambert-Bouger $E_{abs} = E_o(1 - e^{-\alpha l})$ donde, E_o es la energía de un pulso del láser. Aquí α es el coeficiente de absorción óptica del medio, y l la profundidad a la que se mide.

Hemos asumido que la relajación no radiactiva predomina en el medio, por lo que esta relajación será básicamente igual a la energía térmica E_{th} , entregada al medio:

$$E_{th} = E_{abs} = E_o \alpha l \quad \text{Ec. 2-9}$$

Esta súbita expansión crea una onda de presión, la cual viaja radialmente al exterior desde el cilindro iluminado a la velocidad del sonido en el medio v_a . El frente de la onda se expande también desde el límite de penetración del haz en el cilindro hacia delante.

Si el haz está relativamente enfocado, la expansión seguiría una geometría isotrópica en un material homogéneo (una semiesfera dirigida hacia adelante).

Conociendo el calor específico a presión constante C_p podemos evaluar el incremento de temperatura ΔT del volumen iluminado [2].

$$E_{th} = C_p V \Delta T \rho \quad ; \quad \text{Ec. 2-10}$$

V = volumen iluminado

ρ = densidad del material condensado

El volumen iluminado es igual a $V = \pi R^2 \ell$ Ec. 2-11

$$\Delta T = \frac{E_{th}}{C_p V \rho} = \frac{E_o \alpha \ell}{C_p \pi R^2 \ell \rho} = \frac{E_o \alpha}{C_p \pi R^2 \rho} = \Delta T \quad \text{Ec. 2-12}$$

Si asumimos que se trata de un proceso adiabático, expansión isobárica, podemos calcular el nuevo valor de volumen de la región iluminada con ΔR

$$\pi R^2 \ell - \pi (R + \Delta R)^2 \ell = \beta V \Delta T \quad \text{Ec. 2-13}$$

$$\pi R^2 \ell - \pi R^2 \ell - 2\pi R \Delta R \ell - \Delta R^2 \ell = \beta V \Delta T \quad \text{Ec. 2-14}$$

β = coeficiente de expansión volumétrica

$$- \Delta R \ell (2\pi R + \Delta R) = \beta V \Delta T$$

Como: $\Delta R \ll R$ Ec. 2-15

$$- \Delta R \ell (2\pi R) = \beta V \Delta T$$

$$\Delta R = \frac{\beta \pi R^2 \ell \Delta T}{\ell 2\pi R} \quad \text{Ec. 2-16}$$

$$\Delta R = \frac{1}{2} \beta R \Delta T \quad \text{Ec. 2-17}$$

El cambio en la presión p creada a un punto, está relacionado a la frecuencia de la onda de sonido f_a , y al desplazamiento ΔX del medio por cambio de volumen a través de

$$p = 2\pi f_a v_a \Delta X \rho \quad \text{Ec. 2-18}$$

Podemos darnos cuenta que $\Delta X \approx \Delta R$, entonces podemos tener $\Delta X = k * \Delta R$
 $k \equiv$ constante

$$\Delta R = \frac{1}{2} \beta R \Delta T \quad \text{Ec. 2-19}$$

$$p = 2\pi f_a v_a \left(k \frac{1}{2} \beta R \Delta T \right) \rho \quad \text{reemplazando}$$

$$p = k \pi f_a v_a \beta R \Delta T \rho \quad \text{Ec. 2-20}$$

Reemplazando ΔT

$$p = k \pi f_a v_a \beta R \frac{E_o \alpha}{C_p \pi R^2 \rho} \rho \quad \text{Ec. 2-21}$$

$$p = k \frac{f_a}{R} \frac{\beta v_a}{C_p} E_o \alpha \quad \text{Ec. 2-22}$$

Para una geometría fija de iluminación y propiedades del láser, f_a y R pueden ser incluidos en la constante k , entonces tendremos:

$$p = k \frac{\beta v_a}{C_p} E_o \alpha \quad \text{Ec. 2-23}$$

El cambio en la presión p creada en un punto está relacionado con la frecuencia de la onda de sonido f_a y el desplazamiento ΔX de la onda a través de:

$$p = 2\pi f_a v_a \Delta X \rho \quad \text{Ec. 2-24}$$

Para una geometría fija de iluminación láser y unas propiedades dadas del láser, f_a y ΔX pueden incluirse por facilidad en una constante k de la siguiente manera

$$p = k \frac{\beta v_a}{C_p} E_o \alpha \quad k \equiv \text{constante} \quad \text{Ec. 2-25}$$

Esta será entonces la onda de presión que se busca medir con los sensores en el presente trabajo, donde β es el coeficiente de expansión volumétrica del medio, C_p , su capacidad calorífica, E_o a energía del pulso láser.

2.9 Propagación de una onda en sólidos no homogéneo.

El estudio de la propagación de ondas mecánicas en medios no homogéneos es un campo fértil de investigación actual. Gran cantidad de información se encuentra disponible sobre la velocidad de las ondas mecánicas en los medios homogéneos. No así la información acerca de la atenuación. La que ha sido limitada debido a las dificultades en su medición (por ejemplo: acoplamiento transductor-medio) y la complejidad en la interpretación de datos en los espectros [23].

2.9.1 Velocidad y Atenuación:

La propagación de ondas en medios dispersivos puede ser descrita por una dependencia de la velocidad y la atenuación de la onda con la frecuencia, éstas varían para diferentes modos de propagación. La velocidad depende de las propiedades elásticas y propiedades inerciales del medio, esto es, del módulo de Young M , y la densidad ρ de la siguiente manera [23].

$$V_p = \sqrt{\frac{M}{\rho}} \quad \text{Ec. 2-26}$$

La amplitud de la señal decae como una función del tiempo y la distancia de propagación, de una manera complicada debido a la presencia de reflexiones geométricas, dispersión en los bordes, difracción cerca de vacancias, inclusiones o poros en el caso macroscópico. La energía perdida en estos procesos es disipada en forma de calor y emisión de fotones. [23]

2.10 Registro de la Onda Optoacústica.

Para poder detectar y medir la señal optoacústica generada por el impacto de un pulso láser sobre un material dado, es necesario usar sensores adecuados, acondicionar y acoplar correctamente los sistemas de medición, y finalmente, el desarrollo de un procedimiento de procesamiento y análisis de la señal obtenida.

2.10.1 Transformadores Electroacústicos.

Los transformadores electroacústicos transforman la energía acústica en eléctrica, o viceversa. En ellos hay siempre un órgano móvil, cuyo movimiento es el que produce esta transformación, dando lugar a una fuerza electromotriz o

contra electromotriz, según se trate de un generador (micrófonos) o un receptor (auriculares o altavoces).

Dada la reversibilidad de los fenómenos eléctricos y mecánicos, cualquier receptor podría ser un generador, pero prácticamente la realización de los dispositivos exige características constructivas determinadas, que los individualiza [13].

2.10.2. Micrófonos.

Son dispositivos que entregan una salida eléctrica modulada, de acuerdo con la entrada de una señal u onda acústica [13].

Con el objeto de mantener siempre una proporcionalidad entre el estímulo y el efecto producido, idealmente debería existir una relación lineal entre la intensidad sonora incidente y la salida en voltaje.

En lo que respecta a la necesidad de abarcar un campo de frecuencias muy amplio, sería ideal que las propiedades del micrófono detector fuesen independientes del tono del sonido que recogen. Esto no es así en la realidad, y es necesario caracterizar los micrófonos por medio de una curva de respuesta en función de la frecuencia. También debe procurarse que las frecuencias propias del micrófono caigan fuera del campo de las acústicas, es decir que no se exponga a frecuencias de resonancia que lo puedan dañar [13].

2.10.2.1. Micrófono de condensador.

El micrófono de condensador es sensible a la presión y no al gradiente de presión; está constituido por un diafragma vibratorio, sobre una de cuyas caras incide la onda sonora. El diafragma constituye una de las armaduras de un condensador y la otra armadura es fija. Si se aplica una tensión continua, entre las dos armaduras, por la acción de la onda sonora sobre la armadura móvil, se produce una variación de la capacidad del condensador y una corriente de descarga puede circular a través de una resistencia adecuada. La diferencia de potencial entre los bornes de esta resistencia se puede amplificar convenientemente [13].

El micrófono de condensador posee una deformación elástica preponderante como respuesta mecánica a las ondas acústicas y, por

consiguiente, el fenómeno eléctrico que produce la corriente debe ser proporcional al desplazamiento de la armadura.

2.10.3 Transductores Piezoeléctricos.

Los transductores piezoeléctricos, transforman una deformación mecánica en electricidad y viceversa.



Figura 2-9. Generación de Voltaje por deformación de un piezoeléctrico. Al aplicar una energía mecánica y deformar el material piezoeléctrico este genera una diferencia de potencial (gráfico tomado de Cúpich- Elizondo [19]).

2.10.3.1. Funcionamiento.

Los transductores piezoeléctricos se usan ampliamente hoy en día como actuadores o sensores. Para ser útiles en las aplicaciones mencionadas es necesario polarizar el material. Antes de la polarización, esto es, por debajo de la temperatura de Curie, estos materiales exhiben una simetría tetragonal y no manifiestan propiedades piezoeléctricas [19]. Luego de la polarización la estructura cristalina de estos materiales cristalinos cambia a cúbica centrada en las caras.

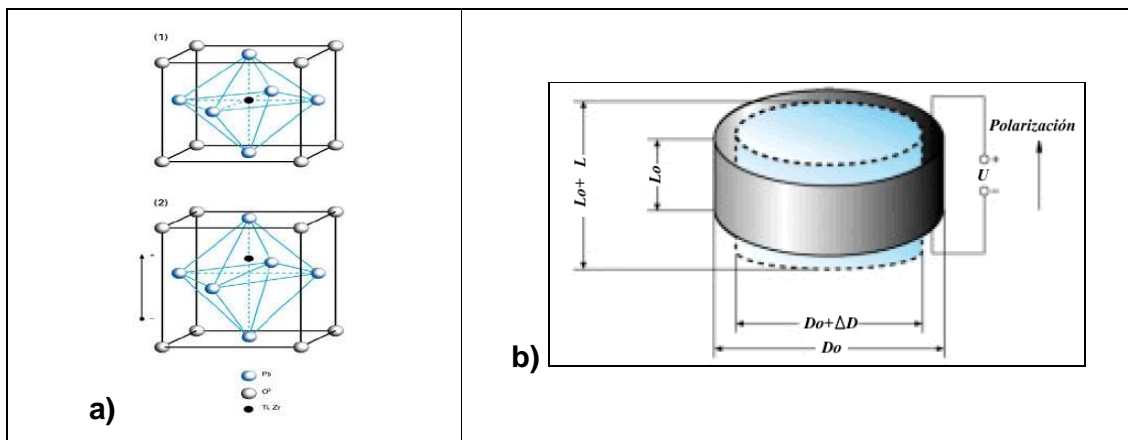


Figura 2-10. a) Celda elemental piezoeléctrica; (1) Antes de polarizarse, (2) Después de Polarizarse (gráfico tomado de James [50]. **b)** Elongación y contracción de un disco de PZT cuando se le aplica un voltaje (gráfico tomado de Cúpich- Elizondo [19]).

El desplazamiento o deformación de los cerámicos piezoeléctricos, es función de la intensidad del campo eléctrico aplicado E del material utilizado y de la longitud L del cerámico. Las propiedades materiales pueden ser descritas por los coeficientes piezoeléctricos de deformación unitaria d_{ij} . Estos coeficientes describen la relación entre el campo eléctrico aplicado y la deformación mecánica producida.

El Desplazamiento D_L de un piezoeléctrico de una sola capa, sin carga, puede ser estimado por medio de la ecuación:

$$D_L = \pm E \cdot d_{ij} \cdot L_o \quad \text{Ec. 2-27}$$

Donde:

L_o = Longitud del cerámico [m]

E = Intensidad del campo eléctrico [V/m]

d_{ij} = Coeficientes piezoeléctricos de deformación unitaria.

CAPÍTULO III

3 Metodología

3.1 Descripción del equipo experimental.

El montaje realizado se ha hecho, aprovechando la existencia de un espectrómetro LIBS en el Depto. de Física y Astronomía de la EPN. Se usó la cámara de mediciones para instalar el material necesario para nuestro proyecto. Para nuestro propósito, el sistema utilizado consta básicamente de los siguientes elementos: Una fuente luminosa, en este caso un láser de Nd:YAG, su respectivo dispositivo de control de disparo y energía (ICE). Una cámara de mediciones, donde se colocaron los sensores electromecánicos usados: un transductor piezoeléctrico PZT y un micrófono de condensador de electroto. Para el tratamiento de la señal del micrófono se utilizó un pre-amplificador incorporado en el micrófono y un amplificador independiente para el mismo.



Figura 3-1. Mesa de Trabajo, a) ICE, b) muestras, c) láser, d) cámara de mediciones, e) micrófono y soporte PZT, f) amplificador, g) fuente, h) osciloscopio digital.

La adquisición y almacenamiento de las señales del PZT y del micrófono se hizo en un osciloscopio digital (Tecktronik, TDS5052,

Portland, USA) para su posterior análisis. En el presente capítulo describiremos las principales características de funcionamiento del equipo. En la *Figura 3-1* se puede observar como están dispuestos los equipos en la mesa de trabajo.

3.2 Fuente Luminosa.

3.2.1 Láser de Nd:YAG.

Sin duda el elemento principal del sistema está constituido por un láser comercial de Nd:YAG (ULTRA CFR de Big Sky Inc. Bozeman, USA) que emite radiación con una longitud de onda de $1.064 \mu\text{m}$, con una energía por pulso de 200 [mJ] y con una duración de pulso de $6,95 \text{ [ns]}$. El láser se detalla en la *Figura 3-2*.



Figura 3-2. a) Integrated Cooler and Electronics (ICE), b) Láser Nd:YAG y c) cámara de medición.

El láser está formado de una cavidad resonante acoplada a un conjunto de elementos y accesorios que hacen posible su funcionamiento. La cavidad resonante está delimitada por dos espejos cóncavos. El anterior tiene una reflectancia del 80%, mientras que la del posterior es del 99%. Entre ambos se encuentran todos los elementos que forman la cavidad láser. El medio activo es

un cristal de $Y_3Al_5O_{12}$. En la *Figura 3-3* también se puede apreciar el interior del compartimiento del láser y sus componentes [26].

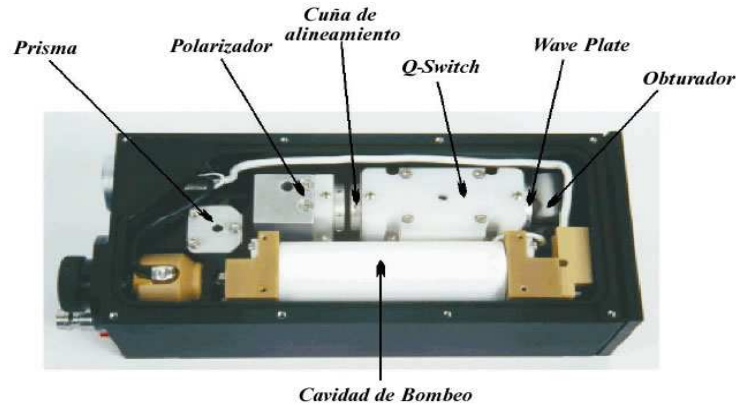


Figura 3-3. Imagen del interior del láser y sus componentes (figura tomada y modificada del Manual Ultra CFR [48])

3.3 Cámara de mediciones y monitoreo por video.

Una parte esencial del sistema constituye la cámara de mediciones y monitoreo por video. Esta se encuentra provista de varias herramientas, tanto para maniobrar dentro de ella como de seguridad. En la *Figura 3-4 a)* se observa un compartimiento en la parte superior, que incluye: un espejo semiplateado perforado para permitir pasar el pulso láser al tiempo que permite ver la muestra por reflexión, un sistema de aumento y una cámara de video. Este sistema de video hace posible monitorear y enfocar de manera segura el haz del láser en la parte deseada de la muestra. En la parte inferior se observa la cámara de medición donde se han instalado los sensores.

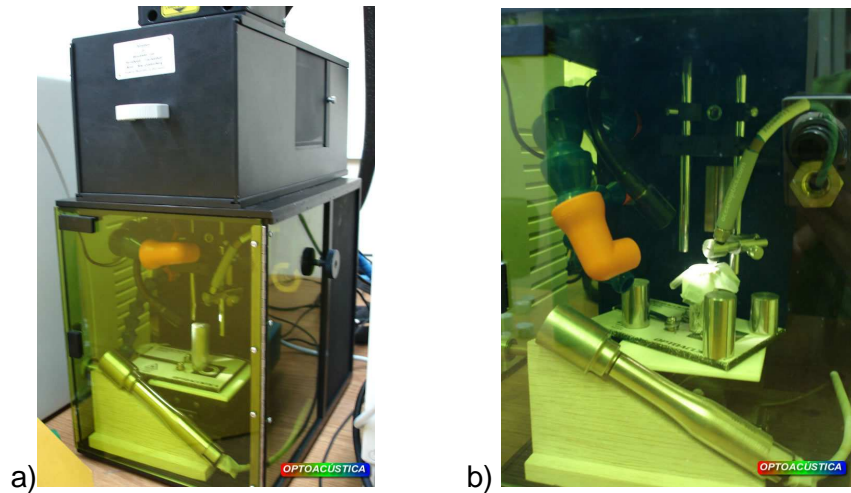


Figura 3-4. a) Cámara de medición con compartimiento para la cámara de video b) Interior de la cámara de medición, donde se observa la disposición de los sensores.

Es importante resaltar que la cámara posee ventanas semitransparentes de seguridad para evitar el paso de la radiación dispersada o reflejada del láser. En la *Figura, 3-4 b)* se puede apreciar la ubicación de los sensores como el micrófono y el soporte del PZT. Una pequeña lámpara iluminando la superficie de la muestra facilita la visualización usada por la cámara de video para enfocar.

3.4 Sensores.

La selección de los sensores se basó principalmente en referencias adecuadas de investigaciones anteriores y en la disponibilidad de los mismos. Usamos un micrófono de condensador de electreto y un transductor piezoeléctrico PZT para el efecto.

3.4.1 Micrófono de Condensador de Electreto.

El micrófono utilizado en este trabajo fue uno de condensador de electreto modelo 1560-2131 de General Radio Corp. (Concord, Massachussets, USA). Su diseño básico es similar al del micrófono de condensador de aire, pero este tiene un diafragma cargado permanentemente y esto hace que no necesite ser polarizado.

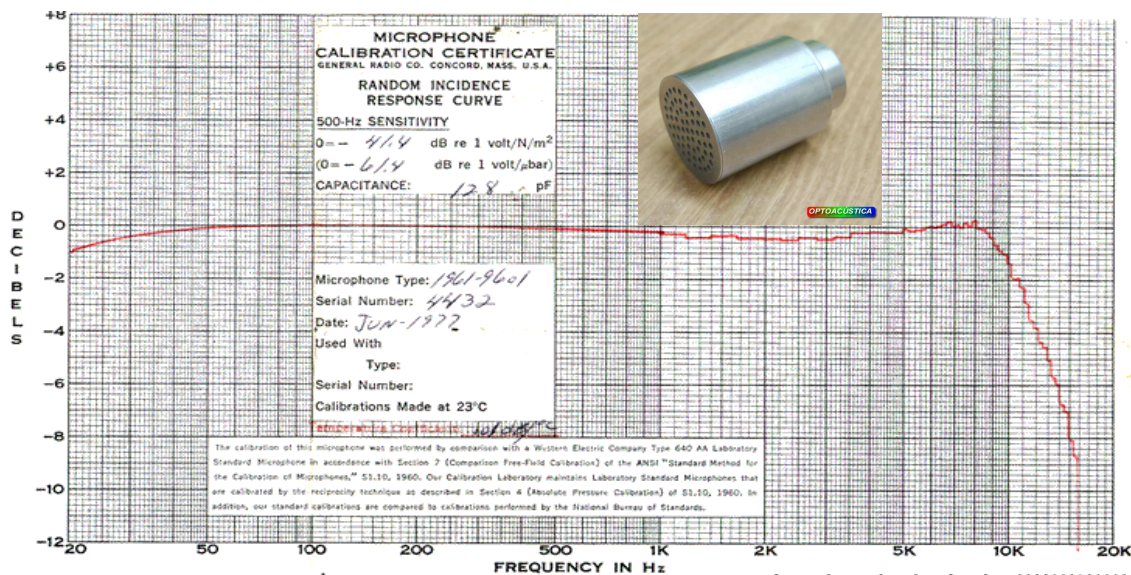


Figura 3-5. Micrófono de electreto de General Radio Corp. y su curva de calibración. (Tomada de la Hoja de Datos del Micrófono [6]).

El micrófono de condensador de electreto adiciona a las ventajas del micrófono de condensador de aire, una alta sensibilidad, una respuesta plana de

frecuencias dentro del rango dinámico, como se aprecia en la curva de calibración de la *Figura 3-5*, y amplio rango dinámico. La carga del electreto está atrapada dentro de una película de polímero [6].

3.4.2 Preamplificador para micrófono.

El preamplificador utilizado es una interfase entre el Micrófono de electreto y el amplificador (AMPACR06 descrito más adelante), de diseño simple y fácil de utilizar. Se usa principalmente para disminuir la salida de voltaje y corriente, ofreciendo una ganancia única. El preamplificador utilizado es de tipo 1972-9600 y es también de General Radio Corp. El preamplificador está polarizado por medio del amplificador de audio AMPACR06 diseñado específicamente para este fin.



Figura 3-7. Preamplificador 1972-9600 de General Radio Corp.

3.4.3 Transductor Piezoeléctrico PZT.

El sensor piezoeléctrico es un transductor de Titanato de Bario en Plomo PZT, posee características muy interesantes principalmente por su tiempo de respuesta y alta sensibilidad gracias a su coeficiente adimensional de conversión electromecánico $d_{ij} = 412$. Es una pastilla de fabricación casera, con electrodos de plata en sus superficies.

3.4.4 Fuente de alimentación para el preamplificador.

Debido a que el preamplificador del micrófono de electreto, necesita un voltaje nominal de polarización para su funcionamiento de 9 [V] [6], se diseñó y construyó una fuente de alimentación adecuada. El amplificador acoplado a esta fuente se denomina AMPACR06 y permite amplificar la señal proveniente del preamplificador.

En este trabajo se pretende mantener estándares de estabilidad, por lo cual fue conveniente diseñar y construir una fuente variable, de donde se puedan obtener los voltajes necesarios, tanto para polarizar el preamplificador, como para polarizar el amplificador de señal. Una sección final permite mediante el uso de reguladores de voltaje y condensadores, estabilizar el voltaje en la salida. En la *Figura 3-8* se muestra el diagrama eléctrico de la fuente.

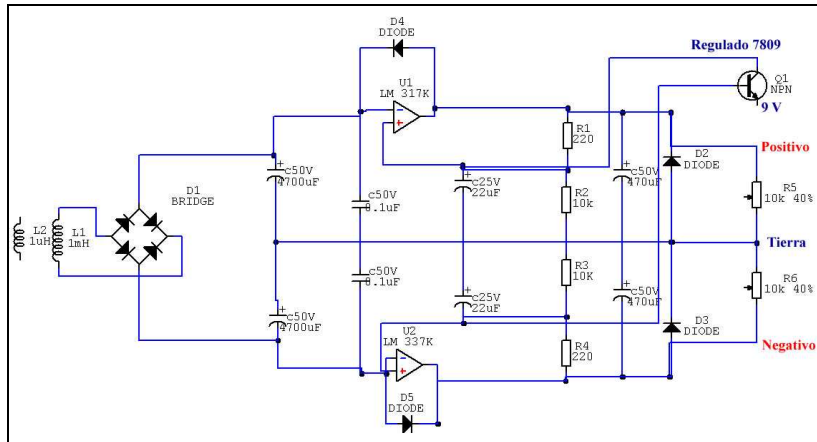


Figura 3-8. Diagrama del circuito eléctrico de la fuente de poder.

La fuente de voltaje se obtuvo después de imprimir su circuito en una baquelita y su ensamblaje en una estructura metálica. Se ubicaron los controles para variar el voltaje positivo, negativo con un máximo de 24 [V] como diferencia de potencial, es decir $\pm 12[V]$. Se instalaron puertos de tipo banana positivo, negativo y tierra, además se agregaron LEDs como indicadores de su funcionamiento y una salida adicional con un dip-switch que sirve como selector entre los reguladores 7809 y 7812, para obtener 9[V] y 12[V] respectivamente.



Figura 3-9. Fuente de alimentación variable con salida adicional regulada para suplir la energía necesaria y polarizar el preamplificador y el amplificador.

3.4.5 Amplificador de Instrumentación para el micrófono AMPACR06.

Este dispositivo hace uso de la fuente mencionada para polarizar al preamplificador y permite alimentar al amplificador de instrumentación. El amplificador se diseñó usando el integrado LM324 que ya contiene un amplificador operacional de buenas características al que solamente hay que polarizar adecuadamente. Su selección se basó en características tales como la presencia de cuatro amplificadores en conjunto, una cualidad importante que no permite que se produzcan variaciones en la señal por efecto de diferencias de temperatura entre ellos.



Figura 3-10. Amplificador **AMPACR06**, alimenta el preamplificador del micrófono y amplifica su señal.

Para nuestro diseño, la ganancia del voltaje de salida esta definida por la relación entre las resistencias y la diferencia de potencial generado por el micrófono según *Ec. 3-3*:

$$V_o = \left[1 + \frac{2R_1}{R_2} \right] (V_{i^+} - V_{i^-}) \quad \text{Ec. 3-3}$$

Es necesario resaltar, que se utilizaron, resistencias de precisión y el montaje en una placa de baquelita para disminuir las corrientes inductivas. El uso de cable coaxial entre el preamplificador y el amplificador reduce de igual manera ruidos y mantiene estable la señal amplificada.

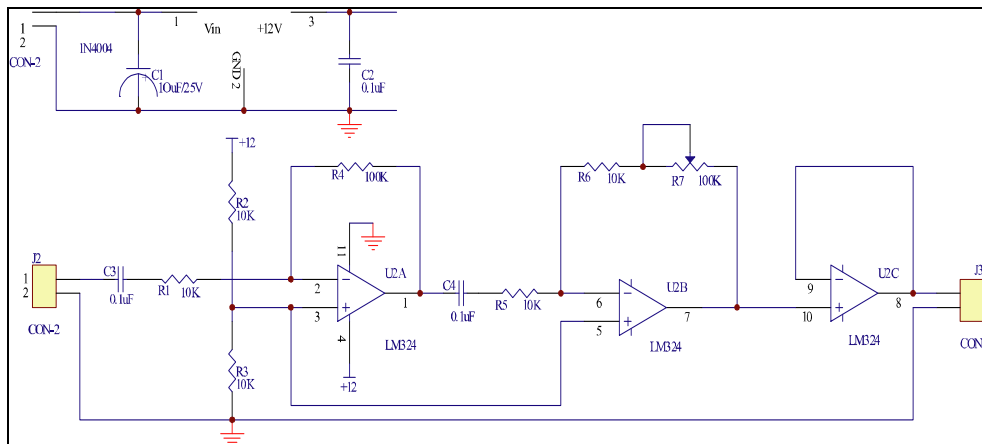


Figura 3-11. Diagrama del circuito Amplificador basado en el integrado LM324, con R7 variable para ajustar la ganancia necesaria.

El circuito fue probado en un simulador computacional, y luego en un tablero de proyectos antes de imprimirlo en una baquelita cuyo diseño final se encuentra en la *Figura 3-12*.

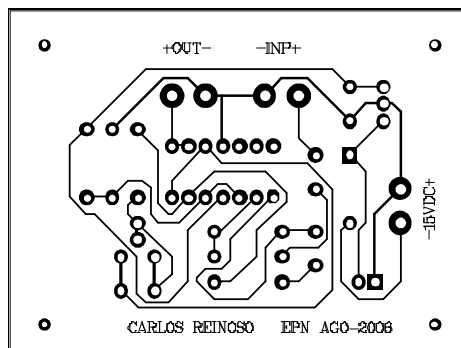


Figura 3-12. Plano impreso del Amplificador de Instrumentación de alta impedancia de entrada usando el cuádruple Amplificador Operacional integrado LM324.

3.4.6 Osciloscopio Digital.

El osciloscopio digital utilizado para analizar la señal fue el TDS5052 de Tektronix (Beaverton, USA), de 500[GHz], con una tasa de muestreo de 5[GSamples/s], y que se controla directamente en una PC. Utiliza el software TekScoupe, por medio del cual, se puede almacenar la información de los registros, en diferentes formatos compatibles con la mayoría de software disponible para análisis.

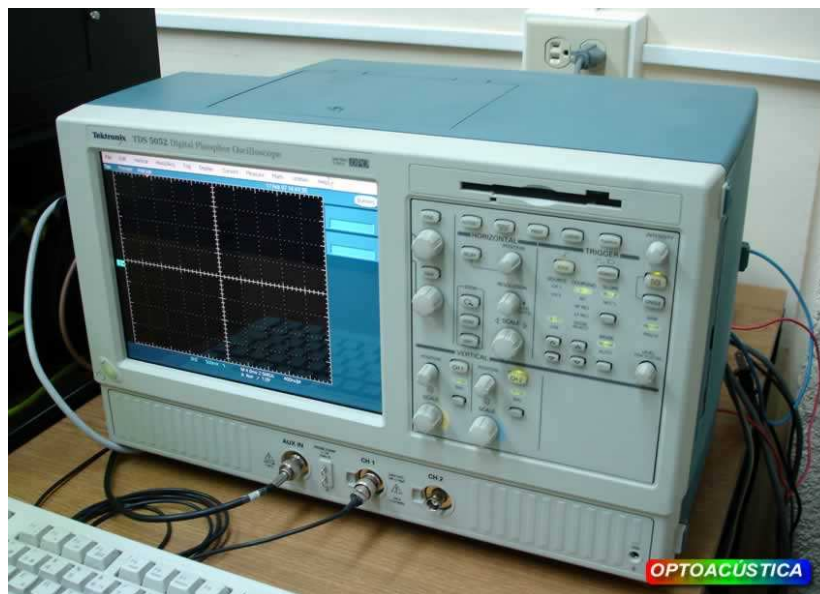


Figura 3-13. Osciloscopio Digital Tektronic TDS5052

3.4.7 Construcción de un soporte para el PZT.

Se diseñó un soporte que contiene al sensor PZT, para su inserción en la cámara de medición. El arreglo proporciona además la opción de utilizar las dos técnicas (LIBS y Optoacústica) conjuntamente en trabajos futuros.

El soporte para el PZT hace que el sensor quede parcialmente sobre la superficie de la placa para permitir que este se mantenga en contacto directo con las muestras y evitar que las vibraciones transmitidas se pierdan por contacto con la placa de soporte (Figura 3-14).



Figura 3-14. Soporte para PZT, con una muestra de Hierro sobre el sensor. El sensor es la pastilla circular en la base del cilindro de hierro, y apenas sobresale a los bordes de este. La pastilla sobresale la superficie de la placa de soporte para asegurar un contacto adecuado con la muestra.

3.4.8 Construcción de Celdas para muestras líquidas.

Aprovechando la existencia de una cámara para muestras en el Depto. De física y astronomía de la EPN, en la cual se puede introducir celdas (*Figura 3-23*). Se construyeron celdas que nos permitiesen llenarlas de medios líquidos, estas celdas fueron elaboradas en dos materiales diferentes, aluminio y teflón, seleccionados principalmente por la disponibilidad del material y por la facilidad de moldearlos en un torno. Se diseñó un arreglo del sistema como se explica mejor en la sección 3.7.3 de este capítulo.

Si bien ambas celdas permiten contener un centímetro cúbico de muestra líquida, cabe indicar que la celda de aluminio contiene al líquido dándole forma cúbica, y la de teflón con un contenedor en forma de cilindro. Ya se disponía de una celda de polietileno y otra de aluminio, ambas con un contenedor cuadrado. Esta diferencia es importante a la hora del estudio del viaje de la onda acústica dentro del medio y sus respectivas connotaciones en la reflexión de las ondas con las paredes del contenedor. Estas celdas se las puede observar en la *Figura 3-15*.



Figura 3-15. Celdas para muestras líquidas y sólidas

3.5 Acoplante acústico.

Se utilizó Glicerina como acoplante acústico entre la muestra y la superficie del sensor PZT, ya que es un líquido viscoso que facilita el paso de las ondas desde la muestra hacia el transductor; esto ocurre particularmente para las altas frecuencias, mismas que no se transmiten bien en el aire. La glicerina cumple con las características ideales de un líquido acoplante: es humectante, es decir capaz de mojar la superficie de la muestra y del PZT, posee una viscosidad adecuada y

baja atenuación, o sea, que el sonido se transmita casi en un 100%, finalmente, es fácilmente removible y no corrosivo [52].

3.6 **Software de Procesamiento Microcal Origin Versión 6.0**

Para el procesamiento de datos se ha utilizado Origin 6.0 (OriginLab Corporation, Northampton, USA). Origin es un paquete de gráficos y análisis de datos que permite procesar matemáticamente los registros obtenidos. Dentro de estos procesos destacamos: la recuperación de los espectros registrados por el osciloscopio digital y su respectiva graficación, manipulación gráfica de los espectros (zoom, por ejemplo), cálculo del espectro de Fourier de frecuencias y amplitudes, y determinación de áreas bajo la curva de la FFT mediante una integración definida, el ajuste de curvas es otra función interesante de este software. Esta última particularmente, debido a que los registros tienen una resolución de 50000 y 100000 puntos, resulta una herramienta imprescindible al momento de procesar información.

3.7 **PREPARACIÓN DE MUESTRAS**

3.7.1 **Metales**

Se estudiaron tres tipos de metales aluminio (Al), hierro (Fe), y acero, seleccionados debido a su homogeneidad y facilidad en su adquisición. Las muestras (probetas), se obtuvieron de barras que fueron perfiladas y cortadas con un torno, para evitar modificaciones en las redes cristalinas por calentamiento, o por deformaciones ocasionados por esfuerzos de cizalla, torción o compresión. Se obtuvieron 6 probetas de cada metal, cuyas especificaciones se encuentran descritas en la *Tabla 3-1* para el aluminio y acero y en la *Tabla 3-2* las especificaciones de las probetas de hierro (*figura 3-16*):

Tabla 3-1. Dimensiones de las probetas de Aluminio y Acero

Espesor	Diámetro
40 [mm]	16[mm]
35[mm]	16[mm]
30[mm]	16[mm]
25[mm]	16[mm]
20[mm]	16[mm]
10[mm]	16[mm]

Tabla 3-2. Dimensiones de las probetas de Acero

Espesor	Diámetro
40 [mm]	9.5[mm]
35[mm]	9.5[mm]
30[mm]	9.5[mm]
25[mm]	9.5[mm]
20[mm]	9.5[mm]
10[mm]	9.5[mm]



Figura 3-16. Probetas de Hierro, Aluminio y Acero de dimensiones que van desde 40 [mm] hasta 10 [mm].

Se utilizó lijas de grano 500 para dar a las superficies de las muestras un acabado uniforme y se limpiaron las superficies con alcohol, para eliminar sustancias grasas.

Para la medición, se colocó una gota de glicerina entre el PZT y la muestra para mejorar la transmisión del sonido en el acoplamiento, y se ubicó el soporte con la muestra dentro de la cámara de medición. La secuencia de disparos se escogió para asegurar una adecuada representatividad estadística de los resultados: se promediaron 50, 100 o 200 pulsos láser, según se explica luego, en cada uno de cinco puntos diferentes sobre el lado plano de las probetas. Estos espectros se analizaron estadísticamente.

3.7.2 Piedra pómez.

Se seleccionaron cuatro tipos de piedra pómez, diferentes entre ellas a simple vista de acuerdo a su peso, diferencia del tamaño, de poros y por su densidad aparente. Se empezó por extraer barras largas para obtener probetas a partir de rocas lo suficientemente grandes como se observa en la *Figura 3-17*.



Figura 3-17. Preparación de probetas de piedra pómez a partir de barras longitudinales para mantener una direccionalidad en los poros de la roca.

El corte en forma de barras tiene como objetivo mantener una relativa igualdad entre las probetas, debido a que a simple vista se puede apreciar que la distribución y forma de los poros sigue una dirección definida en las rocas. Esta estrategia ayuda a mantener ciertas condiciones similares en cada caso para disminuir los errores a la hora de comparar resultados.

Tabla 3-3. Dimensiones de las probetas de piedra pómez.

Espesor	Diámetro Pómez I	Diámetro Pómez II	Diámetro Pómez III	Diámetro Pómez IV
40 [mm]	21,4 [mm]	21,18 [mm]	20,98 [mm]	20 [mm]

35 [mm]	21,4 [mm]	21,18 [mm]	20,98 [mm]	20 [mm]
30 [mm]	21,4 [mm]	21,18 [mm]	20,98 [mm]	20 [mm]
25 [mm]	21,4 [mm]	21,18 [mm]	20,98 [mm]	20 [mm]
20 [mm]	21,4 [mm]	21,18 [mm]	20,98 [mm]	20 [mm]
10 [mm]	21,4 [mm]	21,18 [mm]	20,98 [mm]	20 [mm]

Estas barras se cortaron en probetas con las dimensiones descritas en la *Tabla 3-3* y se las observa en la *Figura 3-18*.



Figura 3-18. Cuatro grupos de probetas de tipos diferentes de piedra pómez.

Como tratamiento inicial, se limpiaron las probetas usando una brocha para evitar la presencia de polvo suelto del mismo material.

3.7.3 Muestras líquidas.

Como muestras líquidas se utilizaron varias concentraciones de permanganato de potasio (KMnO_4) en agua destilada descritas en la *Tabla 3-5*. También se realizaron pruebas con agua destilada pura, alcohol y con glicerina

Tabla 3-4. Concentraciones de KMnO_4 en agua destilada.

Volumen	Concentraciones de Permanganato de Potasio (KMnO_3)				
1 [cm ³]	1 %	4 %	8 %	12 %	16 %

Debido a las limitaciones de la ley de Beer-Lambert-Bouget, no se sobrepasó concentraciones superiores al 16%. éstas indican que puede haber variaciones de la densidad del medio debido a concentraciones altas.



Figura 3-19. Muestras líquidas de KMnO_4 en diferentes concentraciones, alcohol y glicerina

3.8 Mediciones.

3.8.1 Metales.

Se realizaron varias pruebas de calibración usando la muestra promedio de espesor 25[mm], donde se practicaron disparos del láser para determinar la energía de operación adecuada y definir las condiciones para registrar los mejores espectros promedios, para lo que se promediaron entre 50, 100 y 200 pulsos, disparando el láser con una frecuencia de 10 disparos por segundo.

En los metales se disparó sobre 5 puntos en la superficie de las probetas como se muestra en la *Figura 3-20*. En cada caso, para todas las probetas del mismo espesor, se registraron los espectros de todas las probetas del mismo espesor sin variar la distancia entre la lente y la superficie irradiada, logrando de esta manera que el área del spot sea siempre la misma y que por ende la fluencia de energía del láser también lo sea.

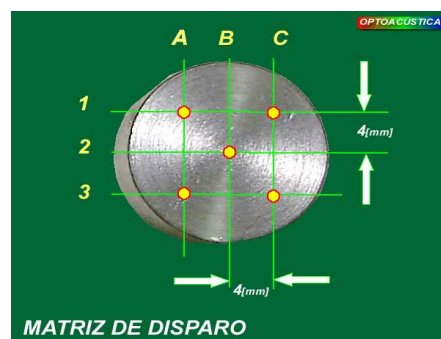


Figura 3-20. Matriz de puntos objetivos del láser, separados 4[mm] entre si.

Un ejemplo de los espectros obtenidos en el osciloscopio digital se aprecia en la *Figura 3-21*:

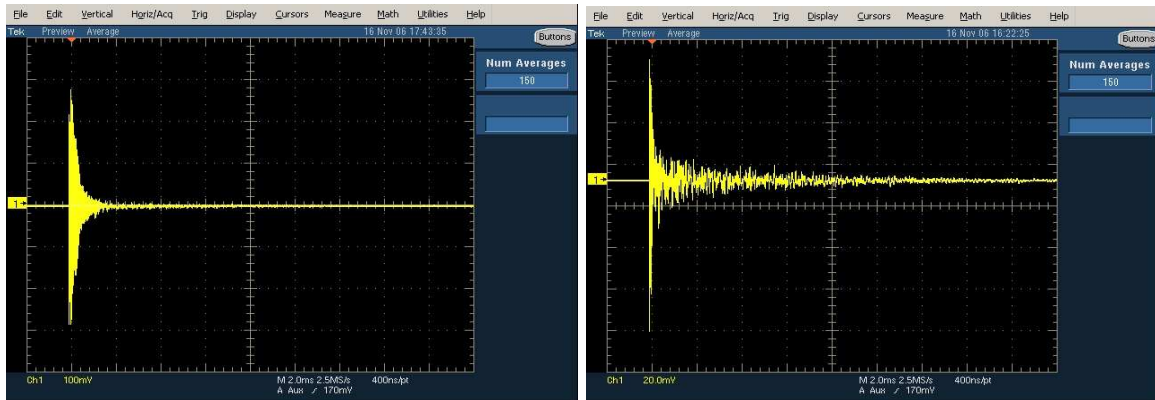


Figura 3-21. Espectros obtenidos en probetas de aluminio de 40[mm] (izq) y de hierro de 40[mm] (der) como se observan en TekScope. Estas señales corresponden a la onda acústica registrada por el PZT.

3.8.2 Piedra pómez.

Para registrar los espectros de las probetas no homogéneas de 4 tipos de rocas diferentes de piedra pómez, se consideraron las variaciones generadas por su estructura, ya que debido a la respuesta de un medio no homogéneo es mucho más variable que un homogéneo. Para lidiar con este problema, fue necesario aumentar la matriz de disparos en la superficie a 9 puntos, y también la resolución del osciloscopio digital se amplió a 100000 puntos por espectro. Con esto se obtiene una mayor precisión de registro.

Se constató que para las muestras de espesor de 40[mm] no se obtenía una buena señal en el PZT. Al parecer, debido a la altura de la probeta y su cercanía a la lente de enfoque del láser, el spot de irradiación era muy grande, y por lo tanto, la fluencia demasiado pequeña, para generar una señal detectable. Por este motivo, solo se consideró para el análisis las probetas desde los 35[mm] de espesor. En la *Figura 3-22* se observa un ejemplo de espectro de piedra pómez.

Se utilizaron testigos de aluminio del mismo espesor para poder verificar la energía recibida por cada probeta de pómez. En el aluminio el láser deja claramente huellas de impacto en su superficie.

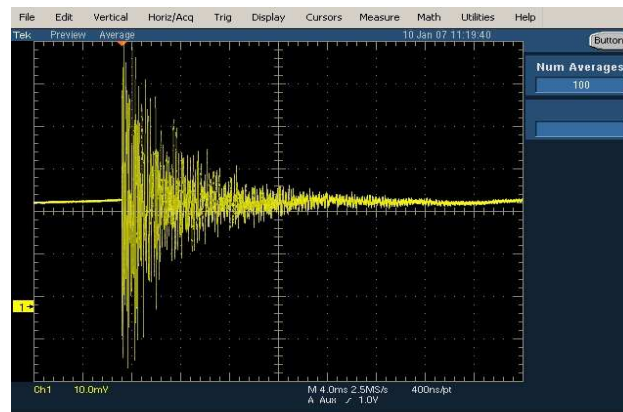


Figura 3-22. Espectro optoacústico del paso de una señal acústica a través de una probeta de piedra pómez de 25[mm] de espesor, registrada con el PZT.

3.8.3 Muestras líquidas.

Las pruebas en sustancias líquidas se realizaron en muestras de 1cm^3 de volumen. Las sustancias investigadas incluyeron agua destilada (H_2O), alcohol etílico ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) y soluciones de permanganato de potasio (KMnO_4) en agua destilada. Este último que tiene un coeficiente de absorción óptica considerable según Hodgkinson et al [30], y por lo tanto debe producir una señal optoacústica importante. Para realizar las pruebas en muestras líquidas, se configuró un sistema sobre una mesa de óptica, en la cual se organizaron diferentes elementos ópticos y de soporte para dirigir y enfocar el pulso láser. Se utilizó un espejo de una cara para guiar el haz hacia las celdas. Estas celdas se fabricaron en casa para este fin. El arreglo experimental se aprecia en la *Figura 3-23*.

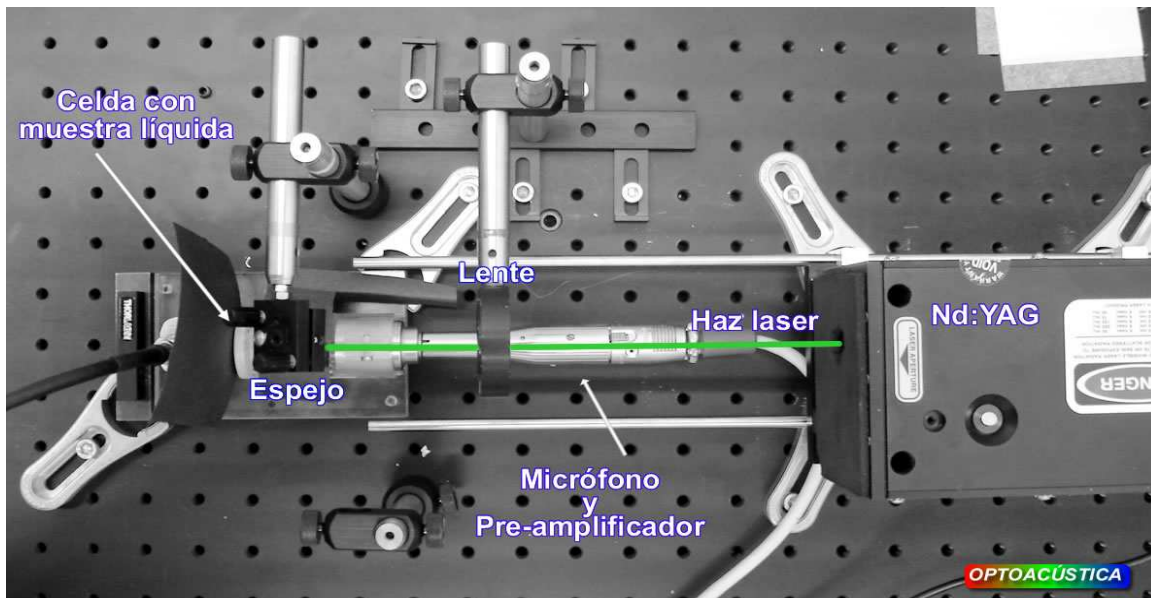


Figura 3-23. Esquema de enfoque del láser para muestras líquidas sobre una mesa de alineación óptica. La celda con el líquido está directamente debajo del espejo, y no se aprecia a simple vista.

La intensidad del láser se ajustó en el ICE hasta observar una señal optoacústica. Ejemplos de los espectros obtenidos se muestran en la *Figura 3-24*. Para estas mediciones se usó solamente el micrófono.

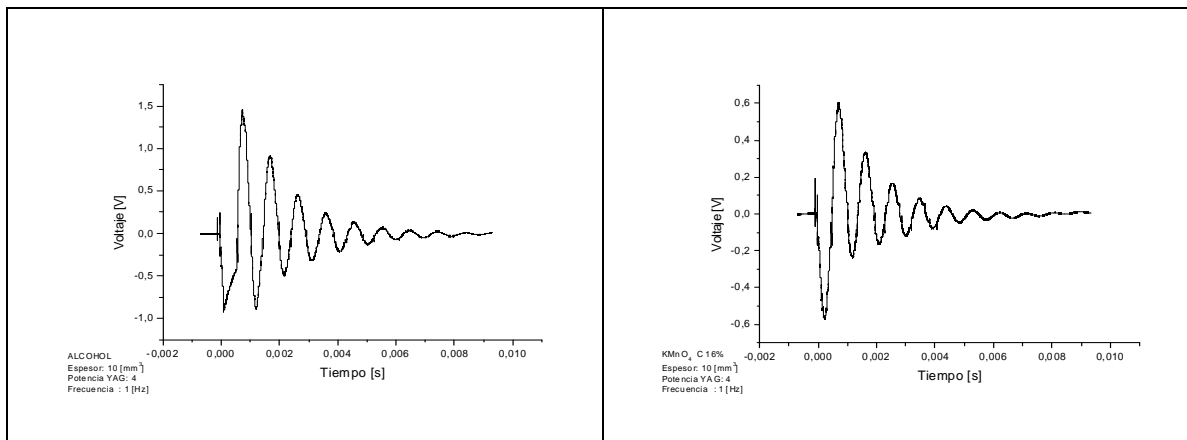


Figura 3-24. Espectro optoacústico de alcohol (H_3C-OH) y de una solución de permanganato de Potasio ($KMnO_4$) al 16%. Se observa la diferencia en intensidad de la señal.

3.9 Error en la medición.

Al ser éste un trabajo experimental, la toma de datos se encuentra expuesta a varias fuentes de error algunos sistemáticos como son: ruido electrónico, resolución del equipo, variaciones en el paso de la señal, etc., y otros no sistemáticos de diversos orígenes.

Una fuente destacable de error, es el acoplamiento acústico del medio al aire en el caso de la medición con el micrófono, y del aire al sensor PZT, la muestra no se mantiene en contacto directo con este elemento sensor, como lo destacan Fratta y Santamarina [23].

En el caso de la medición en las piedras pómez, debe considerarse en particular, que se trata de muestras no homogéneas especialmente en su superficie, como se observa en las fotos antes mostradas. Esto provoca un problema mayor en el acoplamiento. En el proceso de medición no podemos tomar encuentra un solo punto de su superficie, ya que podríamos golpear justamente un poro o alguna área de especial configuración en la superficie, lo cual ocasionaría variaciones en la rapidez de viaje de la onda en el medio, diferentes dispersiones, refracciones y, por supuesto, posibles reflexiones de la radiación incidente. Para reducir estos errores se utilizaron consideraciones estadísticas en la toma de datos, entre los que están principalmente el uso de la promediación de espectros, correspondientes a un tren de pulsos. La promediación se hizo directamente en el osciloscopio.

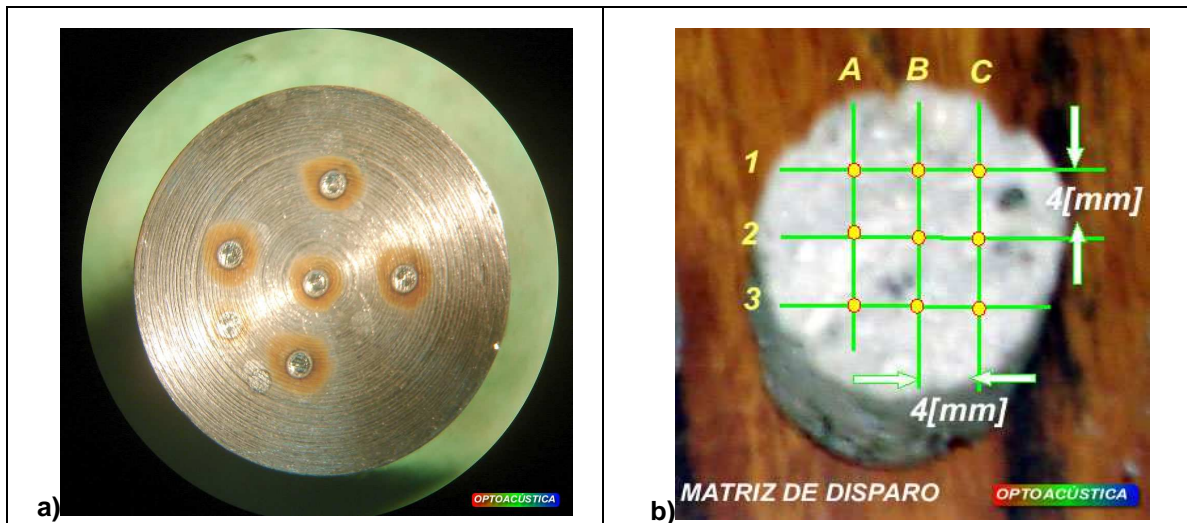


Figura 3-25. Disposición (Matriz) de los puntos de impacto sobre la superficie de una probeta de acero de 25 [mm] **a)** y sobre una probeta de piedra pómez de 25 [mm] **b)**.

Por ejemplo, en los metales se utilizó un frecuencia de disparo de 10[pulsos/segundo], durante 10 segundos, lo que da 100 disparos en cada espectro promediado. Para evitar efectos espurios, debidos a errores de contacto o de acoplamiento con el sensor PZT, se repitieron las mediciones sobre una matriz de

cinco puntos en la superficie de las probetas, como se muestra en la *Figura 3-25 a*). En el caso de la piedra pómez, se definió más bien una matriz de 9, debido a la mayor heterogeneidad del sistema (ver *Figura 3-25 b*)).

Cada uno de los puntos de esta matriz proporcionó un espectro promedio que se comparó con los otros.

Adicionalmente, para el caso de la piedra pómez, el número de disparos por punto, se amplió hasta 150 para obtener el espectro promedio, donde se observó que se estabiliza el espectro registrado a 10[Hz] durante 15 segundos.

3.9 Láser Continuo de He-Ne.

En pruebas preliminares durante la realización de este trabajo se diseñó un sistema optoacústico, en el cual se utilizó un láser continuo de Helio Neón de 633[nm] de longitud de onda de LASER INCORP. Este láser entrega una potencia de 5[mW]. También se utilizó un diodo láser radiando en CA. 650[nm] (Modelo 6232, Imatronic, Hambridge, UK) con una potencia de alrededor de 5[mW]. Estas pruebas se realizaron con (para detección modulada mediante la técnica Lock In), o sin el uso de un chopper mecánico. Este chopper hecho en casa, consiste simplemente de una rueda rotante con agujeros adecuadamente dispuestos, que se hacía girar con un motor estable de CC.

3.9.1 Amplificador Lock In

Para la detección modulada, se utilizó un amplificador Lock In SR810 de Stanford Research Systems, (Dunedin, USA), que es un equipo electrónico de amplificación que permite sincronizar una ventana de sensibilidad con la frecuencia de modulación de la señal (la frecuencia de paso por las perforaciones de la luz láser). Esta sincronización se hace con la señal intermitente que generan un par de diodos emisor-receptor ubicados a ambos lados del Choper. El principio de amplificación modulada permite eliminar ruidos electrónicos y externos no sincrónicos, para dejar únicamente con la señal que buscamos.



Figura 3-27. Imagen del panel frontal del Lock In SR810 (imagen tomada del Manual del Lock In SR810 [7]).

3.9.2 Construcción de una Choper para el láser He-Ne

El choper para modular la señal de los láseres continuos se hizo de un disco de polietileno sobre el que se practicaron dos agujeros, uno para permitir el paso del haz láser hacia la cámara y el otro para la luz que intercambian un par de diodos (detector-emisor). Estos últimos nos entregan la señal para sincronizar al Lock In con los sensores. Un motor EG-530AD-9B de Mabuchi Motors alimentado por 9[V], proporcionó una velocidad de rotación de 2400 RPM. Esta rapidez de giro introduce una modulación de 40[Hz] para el haz láser. Se puede observar en funcionamiento en la *Figura 3-28*.

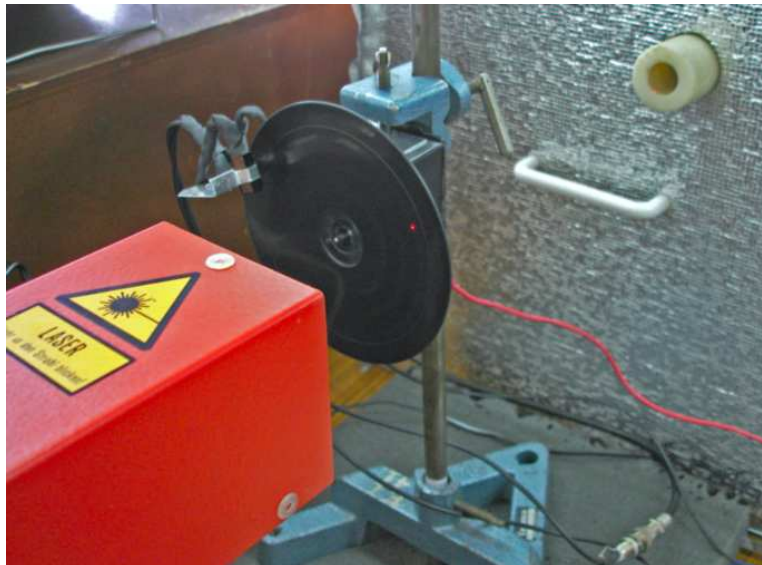


Figura 3-28. Choper, proporcionando pulsos de 40 [Hz] a partir del haz continuo del láser He-Ne. El tubo blanco en la pared plateada del fondo permite la entrada del haz

hacia una cámara especial anecóica construida en casa por el autor para colocar la muestra en esta disposición experimental.

3.9.3 Construcción de una cámara anecóica

En los experimentos iniciales con láser continuos se utilizó una cámara especial aislada acústicamente (anecóica) para eliminar ruidos ambientales en las mediciones. La muestra se ubicó dentro de la cámara y el haz modulado se llevó por medio de espejos apropiados y se enfocó en la muestra con una lente de distancia focal 15[cm]. La reducción del ruido externo tanto en el registro con micrófono de electroto o con el transductor piezoeléctrico (PZT) fue significativa. Ver *Figura 3-29*.

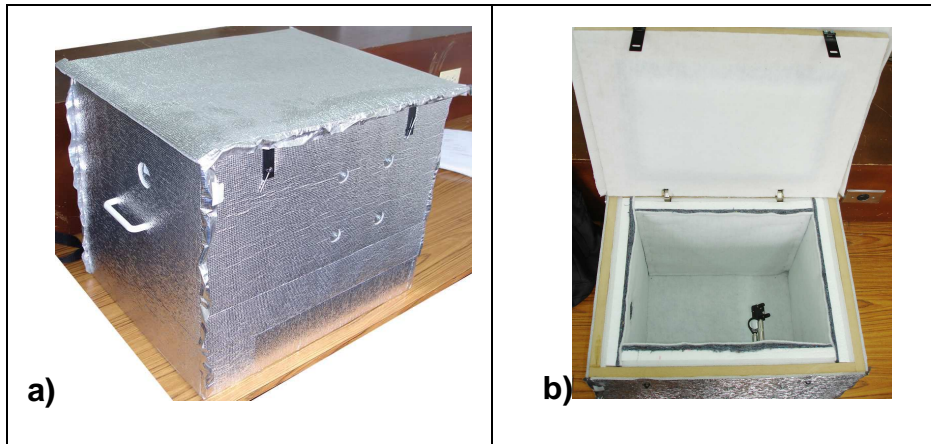


Figura 3-29. Vista externa **a)** e interna **b)** de la cámara anecóica

La caja tiene forma de paralelepípedo con una estructura central de aglomerado de alta densidad denominado MDF, la misma que se recubrió internamente con varios materiales, esponjas y espumas, para su aislamiento acústico como se observa en la *Figura 3-30*. Los materiales se escogieron con impedancias acústicas disímiles para aislar los ruidos externos.

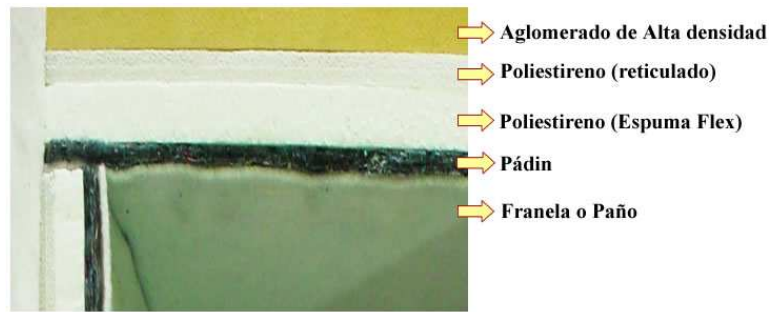


Figura 3-30. Materiales de diferentes impedancias acústicas usadas para aislar ruidos externos.

La cámara posee una ventana de entrada para el haz láser He-Ne. Dentro de esta cámara se ubico el sistema de alineamiento óptico como se muestra en la *Figura 3-31*.

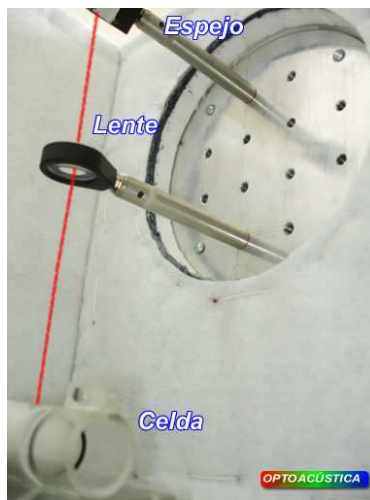


Figura 3-31. Sistema de alineamiento óptico dentro de la caja anecóica.

Lamentablemente, las pruebas realizadas mostraron que no es posible obtener espectros adecuados con este sistema. La razón principal, es probablemente, la baja intensidad del láser en ambos casos o la pobre sensibilidad en la detección de la señal.

CAPÍTULO IV

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos durante la realización de este proyecto con datos mostrados en tablas. Estos informes son el resultado del procesamiento estadístico utilizado para reducir errores de medición.

4.1 **Procesamiento de datos.**

Seleccionamos 3 metales Aluminio, Hierro y Acero, se prepararon las probetas de diferentes espesores. A estas probetas se les aplicó el proceso de análisis optoacústico y se obtuvieron los espectros que se registraron en el osciloscopio digital. Ejemplos de estos espectros se observan en la *Figura 4-1a*. Estos espectros fueron luego recuperados en Origin 6.0, dónde se les estudió de manera cualitativa y cuantitativa. Se observan diferencias notorias a simple vista, tal como se muestra en las *Figuras 4-1b*, *4-1c*, y *4-1d*, correspondientes a probetas de 40[mm] de espesor de aluminio, hierro, y acero, respectivamente.

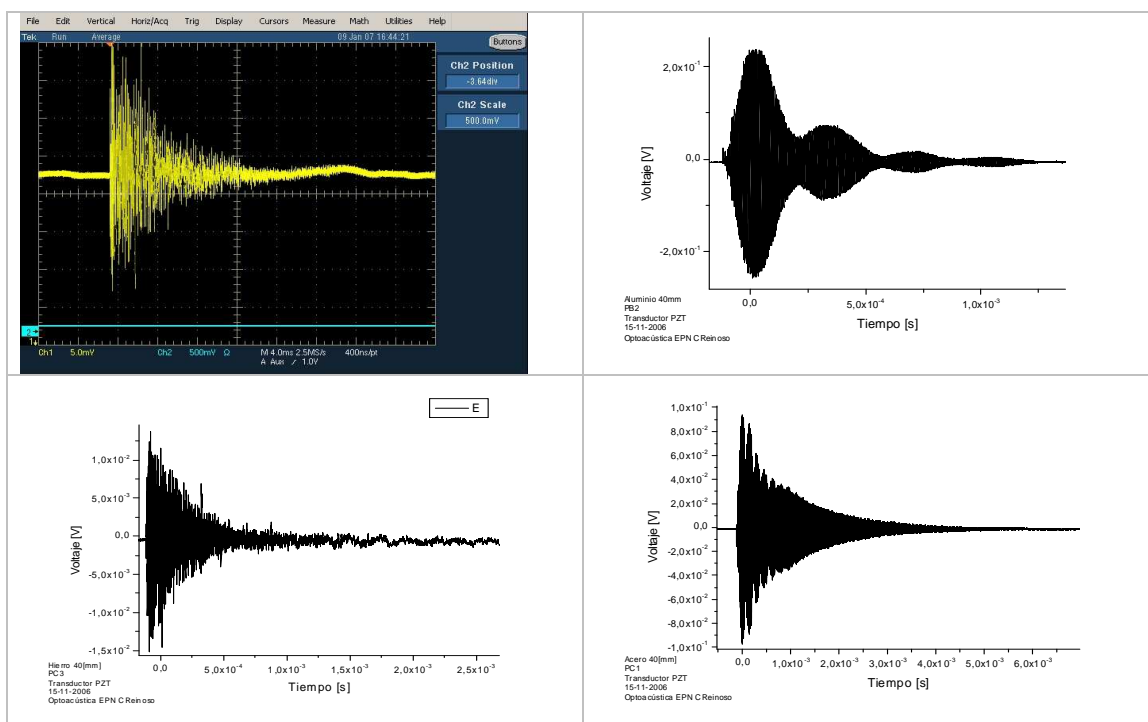


Figura 4-1a) Espectro optoacústico registrado por el Osciloscopio Digital, 4-1b) Espectro de Aluminio 40[mm]; 4-1c) Espectro de Hierro 40[mm] y 4-1d) Espectro de Acero 40 [mm]

De los espectros acústicos se obtuvo luego una transformada rápida de Fourier (FFT), que nos permitió obtener el espectro de frecuencias y sus amplitudes, como se muestra en la *Figura 4-2*.

Al obtener el espectro de Fourier pudimos conocer los armónicos más importantes que conforman el espectro resultante obtenido por el piezoelectrico. Y determinar si alguno de ellos representa alguna característica particular de la sustancia en análisis.

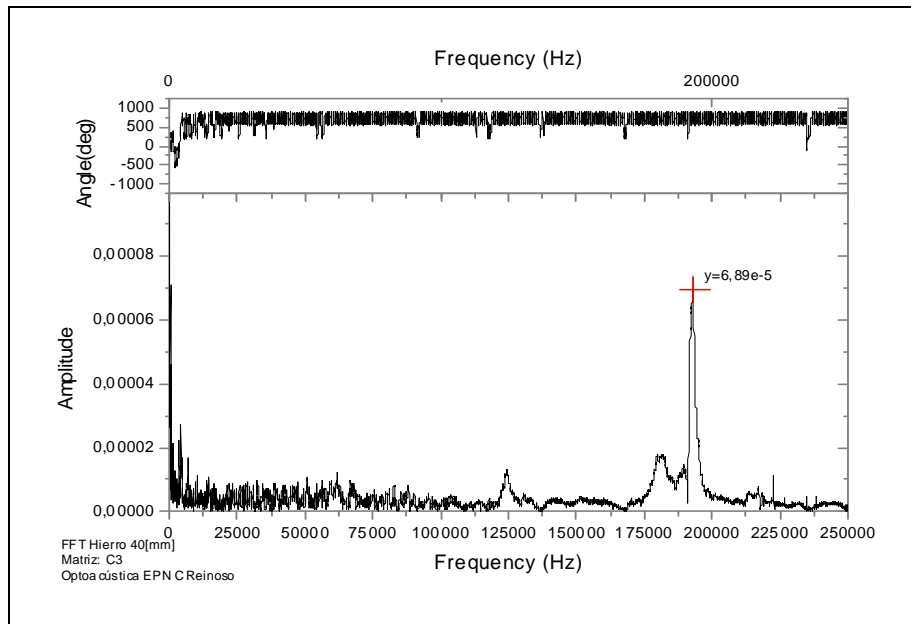


Figura 4-2. Espectro de Fourier de amplitudes y frecuencias de la onda acústica registrada por el PZT en una probeta de hierro de 40[mm].

4.2 Metales

4.2.1 Cálculo de la Velocidad en los metales.

La migración de un pulso acústico a lo largo de una muestra permite de manera directa el cálculo de la velocidad del sonido en el medio en cuestión. Para esto es suficiente medir el tiempo que le toma a la señal viajar desde el punto de impacto inicial (coincidente con el tiempo de disparo del láser) hasta el momento inicial del registro de sonido en el PZT, y se divide para el espesor de la muestra (*ecuación 4-1*). Para hacer estas mediciones, se lanzó un tren de pulsos láser con una frecuencia de 10 [Hz] contra la muestra durante 10 segundos en los 5 puntos de la matriz descrita en la *Figura 3-20*.

Como punto de arribo de la señal, se tomó el valor del punto más cercano al 50% del voltaje registrado en la primera cresta, misma que se consideró es la primera señal eléctrica de importancia generada por el sensor PZT como respuesta a la llegada de una onda acústica que viaja dentro de la muestra como se indica en la *Figura 4-3*. El cálculo de la velocidad se realiza con la *Ecuación 4-1* [29].

$$V_{tv} = \frac{(d_2 - d_1)}{(t_2 - t_1)} \left[\frac{m}{s} \right] \quad \text{Ec. 4-1}$$

Aquí, los subíndices 1 y 2 corresponden respectivamente al punto de impacto y al de salida del láser; $t_2 - t_1$ es el tiempo de viaje de la señal sonora dentro del metal. La *Figura 4-3* ilustra los intervalos temporales considerados en estos cálculos.

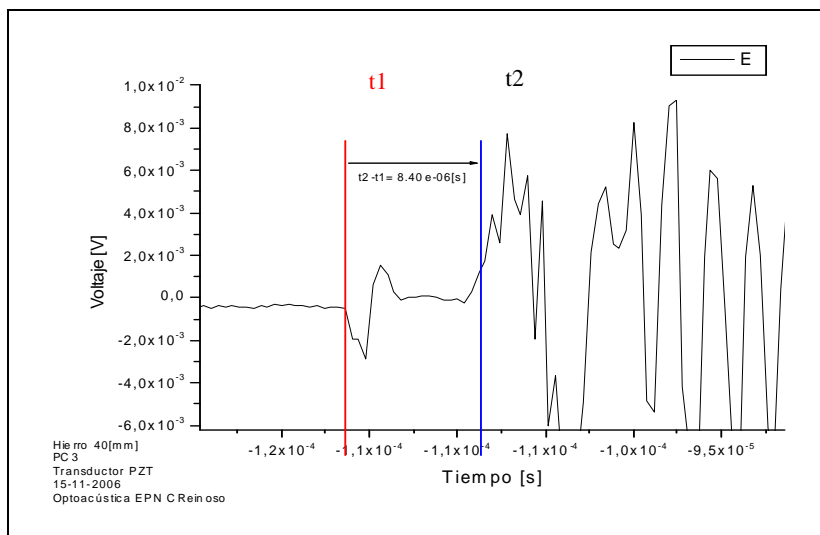


Figura 4-3. Variación del tiempo entre el choque del pulso en la superficie de la muestra y el primer arribo de señal al sensor.

De acuerdo a consideraciones teóricas y datos experimentales previos se conoce que una onda acústica viaja con una velocidad constante en un medio, independiente de la intensidad de la onda [23]. Al considerar la velocidad constante, y conociendo la distancia recorrida por la onda en el medio (espesor) y descrito el tiempo en el espectro podemos calcular la velocidad [29]. Este proceso se efectuó para cada uno de los puntos de la matriz y en cada una de las probetas.

En la *Tabla 4-1* se muestran las velocidades promediadas calculadas con la *Ecuación 4-2* para los metales por el método optoacústico y se los compara con los encontrados en la literatura [32].

$$\bar{X} = \frac{\sum x}{n} \quad \text{Ec. 4-2}$$

Tabla 4-1. Cálculo de la velocidad del sonido en las probetas metálicas

	Media \bar{X} [m/s]	Desviación Estándar σ	% Error	Velocidad [m/s] Literatura Científica [32]
Aluminio	4866,35	470,85	9,68%	4900
Hierro	4628,59	303,48	6,56%	5100
Acero	5124,01	392,49	7,66%	5150

La velocidad medida para probetas de diferentes espesores no muestra gran variación como se puede observar en las *Figuras 4-4, 4-5 y 4-6*, donde se muestra la velocidad de la onda acústica en cada una de las probetas con sus respectivas barras de error de acuerdo a la *Tabla 4-1*. Esto confirma las expectativas iniciales con respecto a este parámetro en los medios homogéneos estudiados.

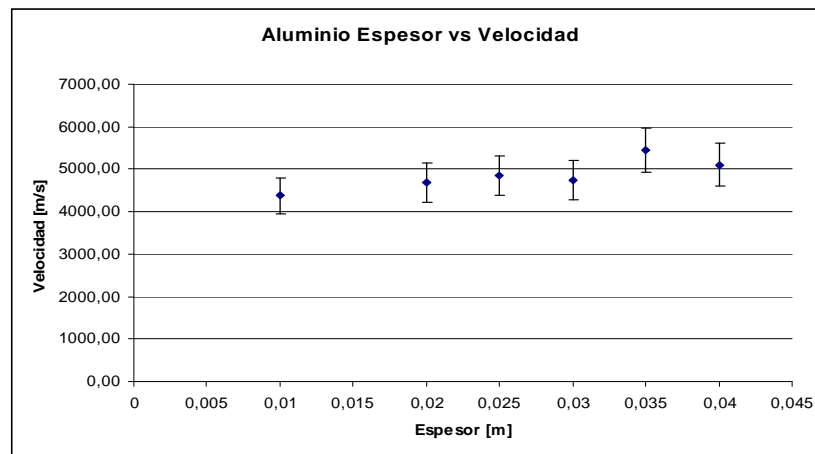


Figura 4-4. Velocidades de la onda acústica en las probetas de Al para diferentes espesores.

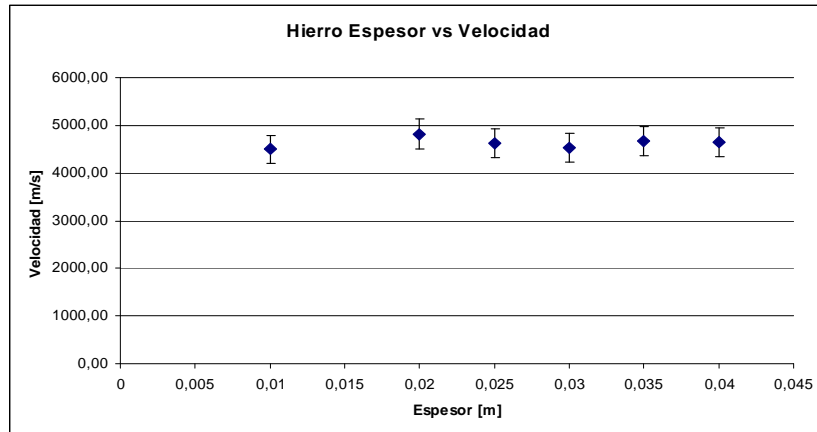


Figura 4-5. Velocidades de la onda acústica en las probetas de Fe para diferentes espesores.

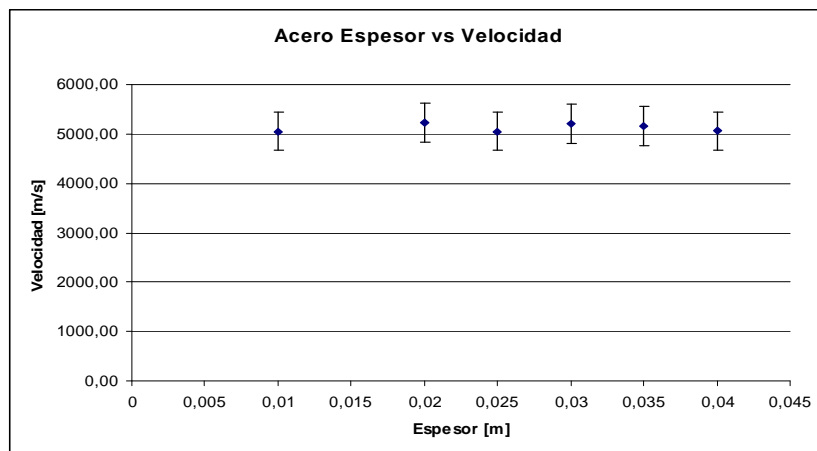


Figura 4-6. Velocidades de la onda acústica en las probetas de Acero para diferentes espesores.

4.2.2 Atenuación en Metales

La determinación de la atenuación de ondas acústicas en metales y otros medios es interesante, por que permite considerar este coeficiente para diferentes tipos de diseños de máquinas, estructuras de ambientes de construcción y consideraciones pertinentes al momento de trabajar con dichos materiales. Incluso se podría utilizar para evaluar el uso de materiales en aislamientos acústicos de manera cuantitativa.

4.2.2.1 Cálculo de la Atenuación por ajuste exponencial.

Se encontró mediante un análisis efectuado a los espectros acústicos de las muestras de la siguiente manera:

Utilizando las crestas de las ondas en la parte positiva del espectro se realizó un ajuste de curva de decaimiento exponencial (*Ecuación 4-3*). En general, si se incluye una señal de fondo superpuesta se debería utilizar más bien la de *Ecuación 4-4*. En estas ecuaciones, a su vez, el coeficiente de atenuación se obtiene de la expresión mostrada en la *Ecuación 4-5*.

$$A = A_0 e^{-\alpha x} \quad \text{Ec. 4-3}$$

$$Y = Y_0 + Ae^{-\frac{1}{t}x} \quad \text{Ec 4-4}$$

$$\alpha = \frac{1}{t} \quad \text{Ec. 4-5}$$

Un ejemplo de curva de ajuste se puede ver en la *Figura 4-7*.

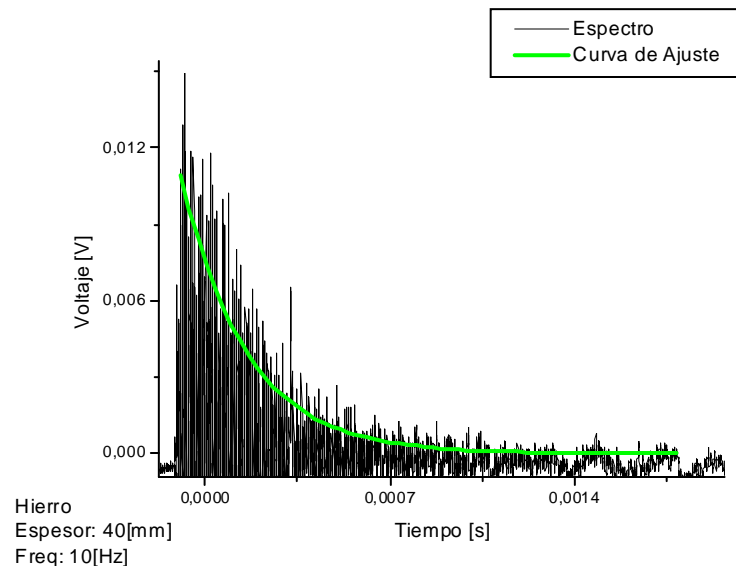


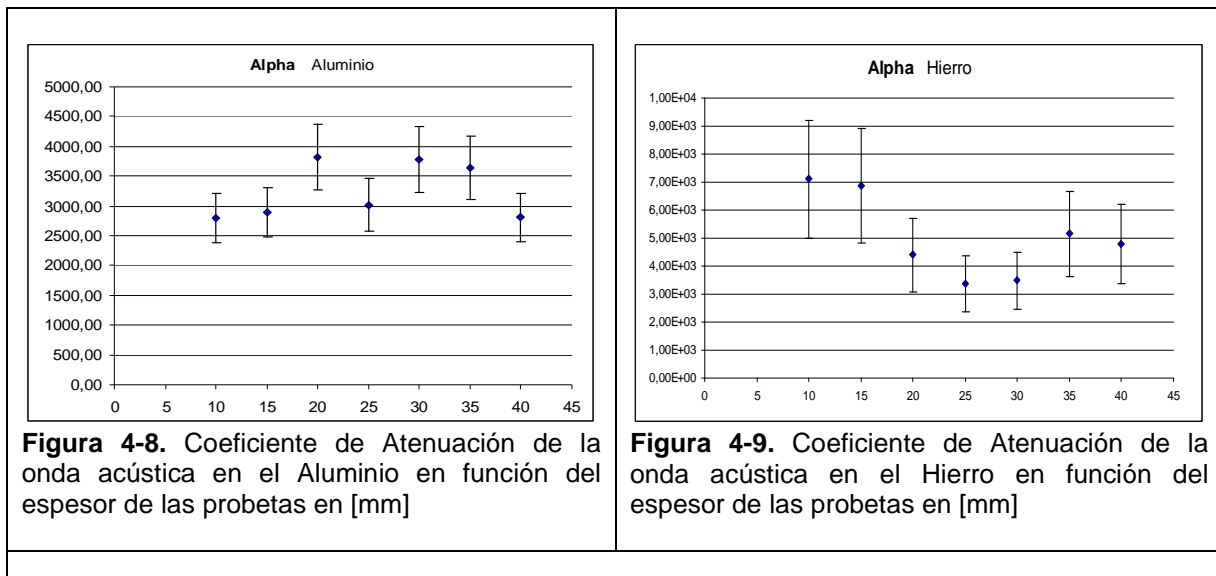
Figura 4-7. Ajuste de la curva de atenuación de la onda acústica en su respectivo espectro acústico.

Se ajustaron las 90 curvas de las probetas de los metales y tras brindarles un tratamiento estadístico se obtuvo la siguiente tabla de datos:

Tabla 4-2, Datos tratados estadísticamente de los Coeficientes de atenuación de las muestras metálicas de Al, Fe y Acero.

Espesor [mm]	ALUMINIO		HIERRO		ACERO	
	t	α	t	α	T	α
10	2,24E-04	4457,94	2,86E-04	3499,81	2,15E-04	4640,70
15	2,79E-04	3587,81	2,51E-04	3988,85	2,26E-04	4421,68
20	2,62E-04	3812,49	2,56E-04	3901,49	2,52E-04	3964,66
25	2,31E-04	4327,57	2,37E-04	4214,18	2,60E-04	3851,01
30	2,65E-04	3779,18	2,27E-04	4404,67	2,19E-04	4568,07
35	2,21E-04	4518,18	2,74E-04	3648,57	2,25E-04	4436,56
40	2,56E-04	3909,05	2,51E-04	3979,17	2,47E-04	4046,15
X media		4056,03		3948,10		4275,55
Desv. Estándar		370,95		309,50		315,09
Error		9,15%		7,84%		7,37%

Esta tabla presenta los resultados de los coeficientes de decaimiento encontrados, mismo que como expresamos, esta relacionado con el coeficiente de atenuación del material, observándose cierta homogeneidad relativa, también, consistente con los resultados similares observados para la velocidad, como se puede apreciar en las Figuras 4-8 a 4-10, las cuales muestran gráficamente el coeficiente de atenuación en función del espesor de la muestra.



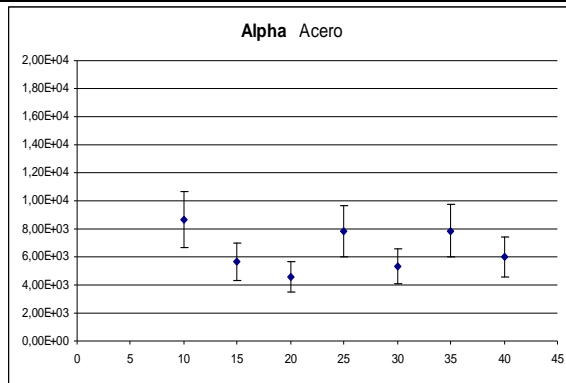


Figura 4-10. Coeficiente de Atenuación de la onda acústica en el Acero, en función del espesor de las probetas en [mm]

4.3 Piedra Pómez

4.3.1 Cálculo de la velocidad de la onda acústica en un medio poroso.

En el caso de las piedras pómez, de diferente porosidad aparente, a partir de los espectros obtenidos (*Figura 4-11*), se calculó la velocidad de la onda acústica en el medio usando la *Ecuación 4-1* y se encontraron los resultados indicados a continuación. Para la piedra pómez I estos se resumen en la *Tabla 4-3*.

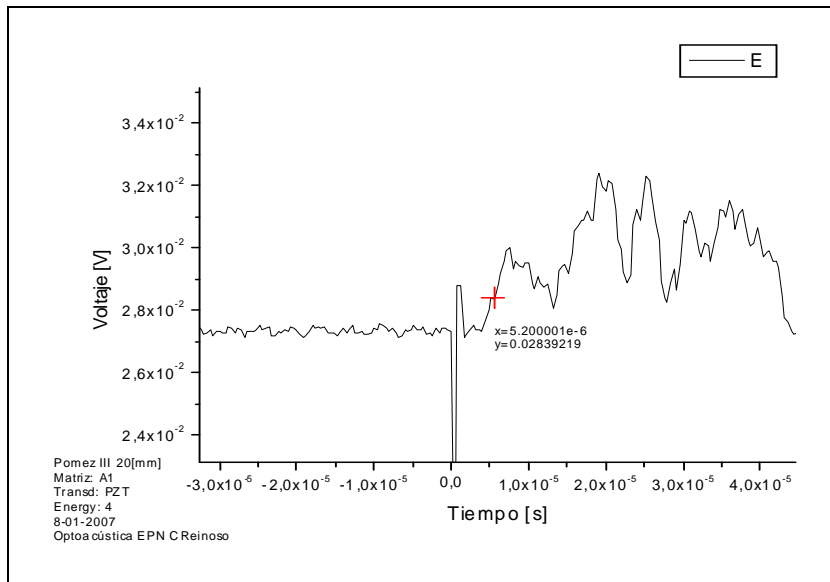


Figura 4-11. Espectro optoacústico de piedra pómez, donde se observa el punto marcado como referente para el cálculo de la velocidad de la onda.

Tabla 4-3 Velocidades encontradas para los distintos espesores y muestras de piedra pómez como resultado de un tratamiento estadístico.

Pómez I	Pómez II	Pómez III	Pómez IV

Espes. [m]	Veloc. [m/s]	Espes. [m]	Veloc. [m/s]	Espes. [m]	Veloc. [m/s]	Espes. [m]	Veloc. [m/s]
0,035	2521,77	0,035	2905,41	0,035	3116,55	0,035	2945,88
0,03	2216,78	0,03	2881,33	0,03	3397,26	0,03	2993,32
0,025	2348,58	0,025	2911,43	0,025	3679,44	0,025	2988,06
0,02	2321,55	0,02	2893,16	0,02	3874,64	0,02	3011,62
0,015	2575,11	0,015	2865,73	0,015	3339,48	0,015	3170,09
0,01	1964,47	0,01	2674,16	0,01	3162,48	0,01	2647,72
Velocidad	2324,71	Promedio	2855,20		3428,31	Promedio	2959,45
Desv. Estándar	261,93	Desv. Estándar	215,93	Desv. Estándar	407,74	Desv. Estándar	260,59
Error	11,27%	Error	7,56%	Error	11,89%	Error	8,81%

Podemos observar que los resultados mostrados en esta tabla, indican una marcada estabilidad en la velocidad de la onda acústica dentro de las piedras pómez, y esto esta de acuerdo a la teoría de ondas y perturbaciones, la misma que señala que una onda viaja a una velocidad constante dentro de un medio, independientemente del tamaño o de la intensidad de la onda, se muestra que las velocidades oscilan entre 2324 y 3428 [m/s], también se muestran sus correspondientes desviaciones estándar y el error en la medición, que como se puede ver llega hasta un 11,89%

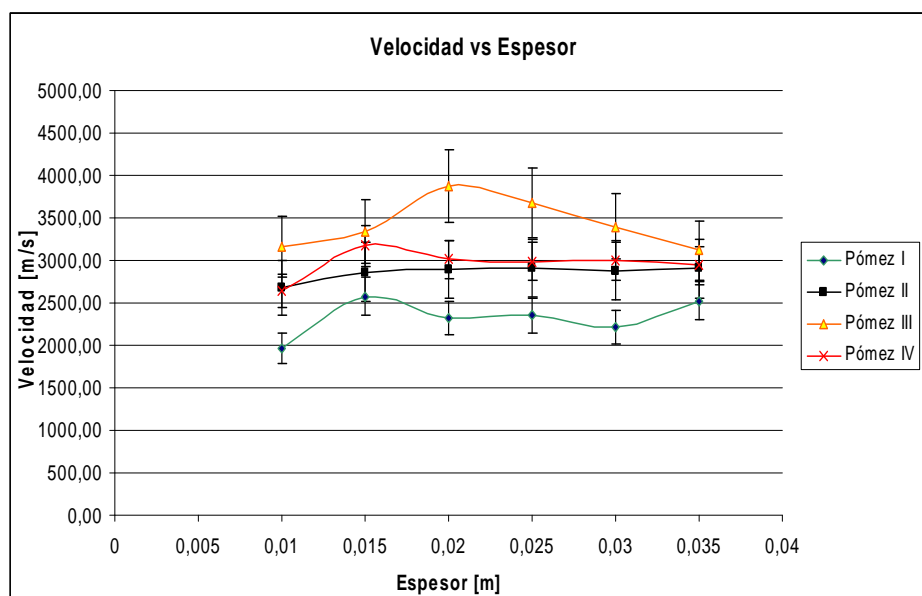


Figura 4-12. Velocidad de la onda acústica en cada una de las probetas de diferente espesor de piedra pómez I. La velocidad es prácticamente independiente del tamaño de la muestra

En resumen las velocidades promedio encontradas mediante el uso de esta técnica son las siguientes descritas en la *Tabla 4-4*, y se integran en la *Figura 4-13* para una mejor apreciación. La dispersión de las medidas de velocidad es mayor en estos casos. Esto se explica por la gran heterogeneidad del material, la presencia de inclusiones sólidas y burbujas, así como de poros de diferentes tamaños en la piedra pómez. Sin embargo, es interesante notar que las Piedras Pómez II a IV muestran valores muy parecidos, dentro del error experimental, pero más bien diferentes de la Piedra Pómez I.

Tabla 4-4. Velocidades del sonido para diferentes tipos de piedra pómez.

	Media \bar{X} [m/s]	Desviación estándar σ	% error
Pómez I	2324,71	261,93	11,27%
Pómez II	2855,20	215,93	7,56%
Pómez III	3428,31	407,74	11,89%
Pómez IV	2959,45	260,59	8,81%

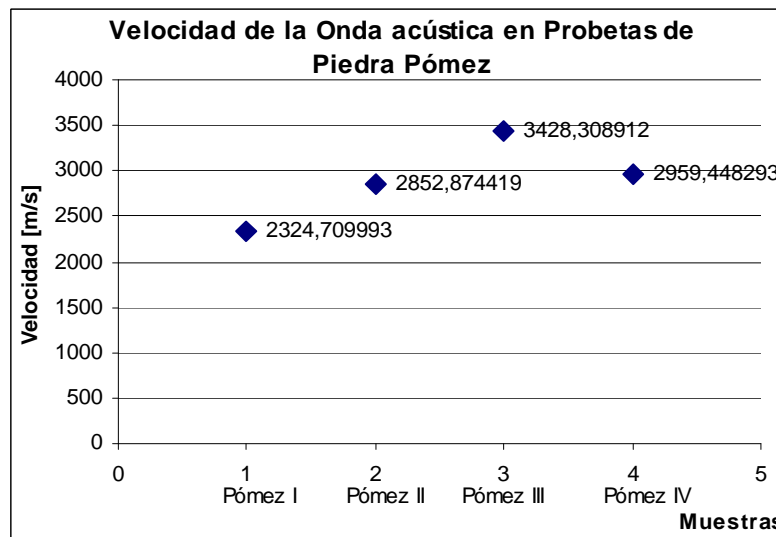


Figura 4-13. Valores de velocidad de la onda acústica de las cuatro muestras de piedra pómez.

4.3.2 Cálculo de la Atenuación por ajuste exponencial en Piedra Pómez

De la misma manera que para los metales se obtuvieron los coeficientes de atenuación de las probetas de piedras pómez usando una herramienta digital de ajuste a una curva de decaimiento exponencial correspondiente al decaimiento de la onda por amortiguamientos, de donde se obtuvo la siguiente tabla de datos estadísticos correspondiente a 216 espectros.

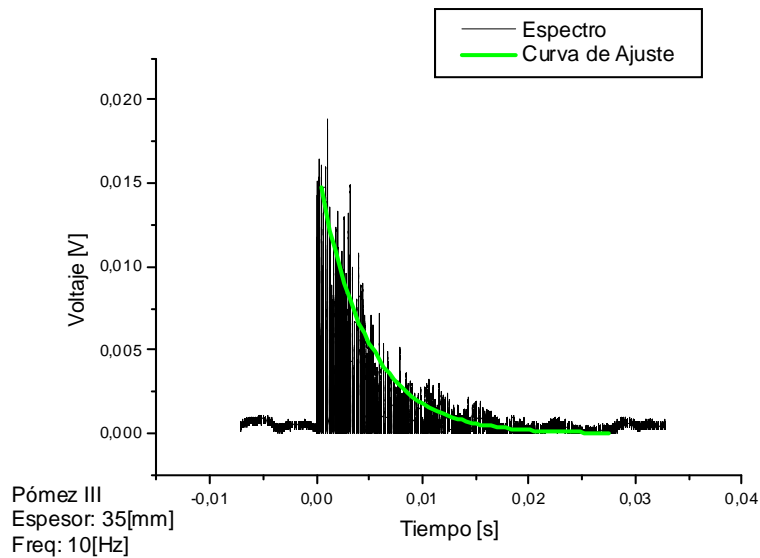


Figura 4-14. Ajuste de la curva de decaimiento exponencial en un espectro de piedra pómez

Tabla 4-5 Datos tratados estadísticamente de los Coeficientes de atenuación calculados en las muestras de piedra pómez

	PÓMEZ I		PÓMEZ II		PÓMEZ III		PÓMEZ IV	
	T	α	t	α	t	α	t	α
10	4,45E-03	224,63	4,63E-03	216,09	4,83E-03	206,85	3,92E-03	254,86
15	4,52E-03	221,40	4,32E-03	231,72	4,86E-03	205,62	5,04E-03	198,56
20	4,13E-03	241,94	4,52E-03	221,48	5,40E-03	185,22	5,50E-03	181,72
25	4,43E-03	225,56	4,37E-03	228,68	4,99E-03	200,27	4,96E-03	201,79
30	4,28E-03	233,57	4,49E-03	222,72	5,43E-03	184,12	5,31E-03	188,40
35	4,30E-03	232,67	4,54E-03	220,07	4,97E-03	201,07	3,91E-03	255,47
X Media		229,96		223,46		197,19		213,47
Desv Est		7,55		5,76		10,03		33,08
Error		3,28%		2,58%		5,09%		15,50%

Esta tabla presenta los datos obtenidos del ajuste de la curva de decaimiento, representado por t que es el dato entregado por el software, y a partir de él, encontramos α que es el coeficiente de atenuación de la onda acústica. En las columnas del coeficiente de atenuación se observa una homogeneidad en sus resultados, es decir una cierta estabilidad alrededor de una media marcada con sus respectivas desviaciones estándar, esto nos permite ver que el coeficiente de atenuación es independiente del espesor de la muestra, convirtiéndose ciertamente en una constante característica propia de un material.

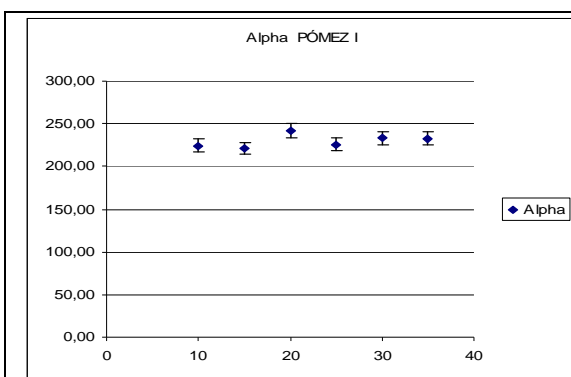


Figura 4-15. Coeficiente de Atenuación de la onda acústica en el Pómez I

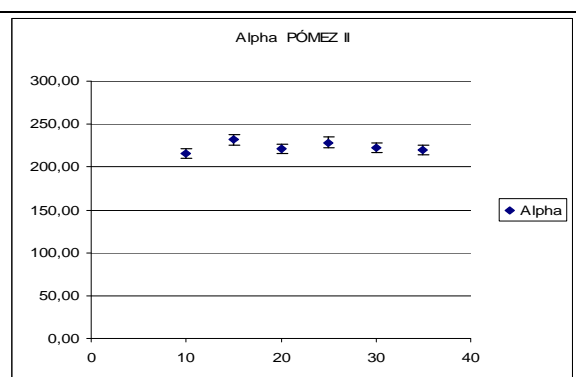


Figura 4-16. Coeficiente de Atenuación de la onda acústica en el Pómez II

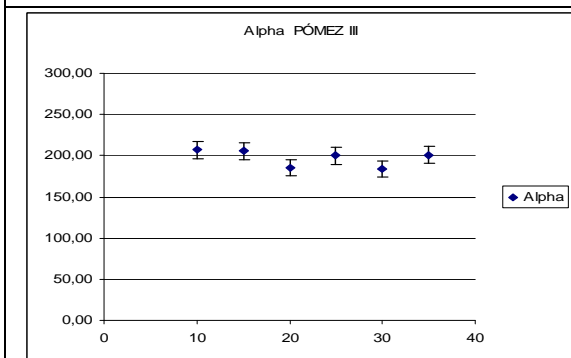


Figura 4-17. Coeficiente de Atenuación de la onda acústica en el Pómez III

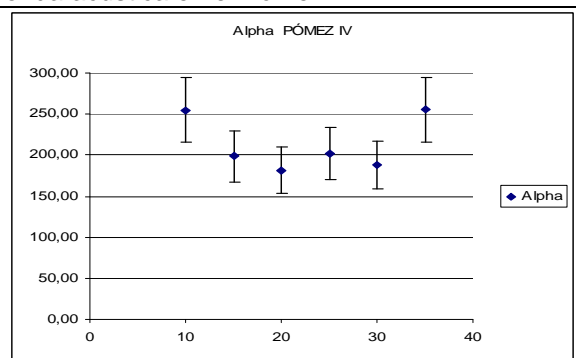


Figura 4-18. Coeficiente de Atenuación de la onda acústica en el Pómez IV

En las Figuras 4-15 a 4-18 se puede apreciar que el coeficiente de atenuación acústica mantiene cierta estabilidad, en correspondencia con noción de que las piedras pómez son materiales relativamente homogéneos, al menos aparentemente, se puede ver claramente que el nivel de error en la muestra de Piedra Pómez IV se eleva hasta el 15,5%,. Misma que puede estar relacionada con un error correspondiente con el acoplamiento.

4.4 Muestras líquidas.

Para los materiales líquidos estudiados se observaron los siguientes espectros, que se analizan de manera cualitativa en lo que sigue.

La señal de voltaje que obtenemos desde el micrófono es debida a un presión en el diafragma del mismo y corresponde al registro de la perturbación que viaja desde la superficie de la muestra por el aire hasta el micrófono, esta perturbación se puede observar en la *Figura 4-19* a la *Figura 4-21*, de muestras líquidas de Alcohol, permanganato de potasio disuelto y glicerina.

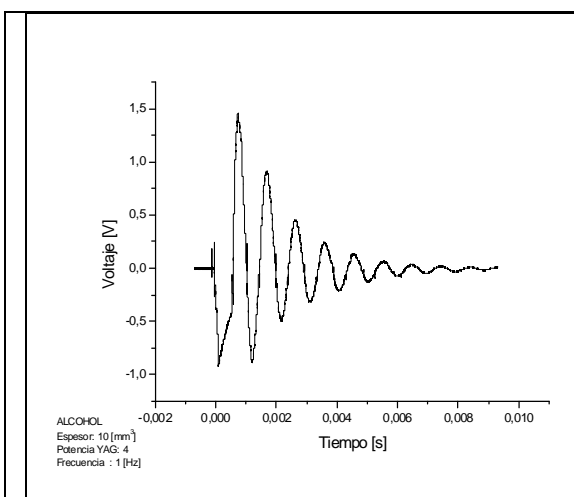


Figura 4-19. Espectro de la onda acústica del impacto del láser en una muestra líquida de 1[cm³] Etanol al 70% (H₃C-CH₂-OH) registrado por el micrófono.

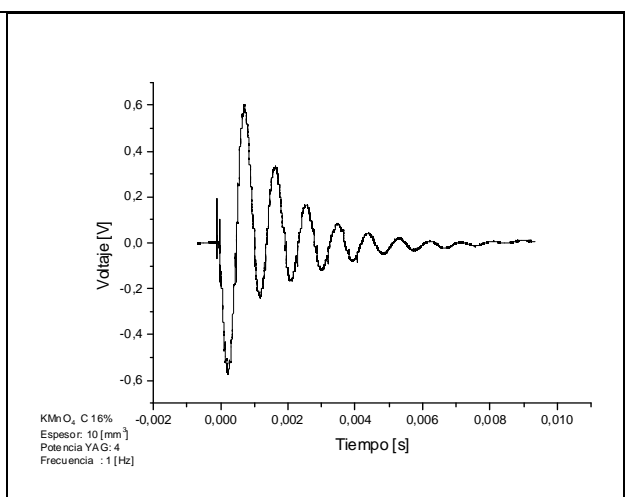


Figura 4-20. Espectro de la onda acústica del impacto del láser en una muestra líquida de 1[cm³] KMnO₄ al 16% de concentración registrado por el micrófono.

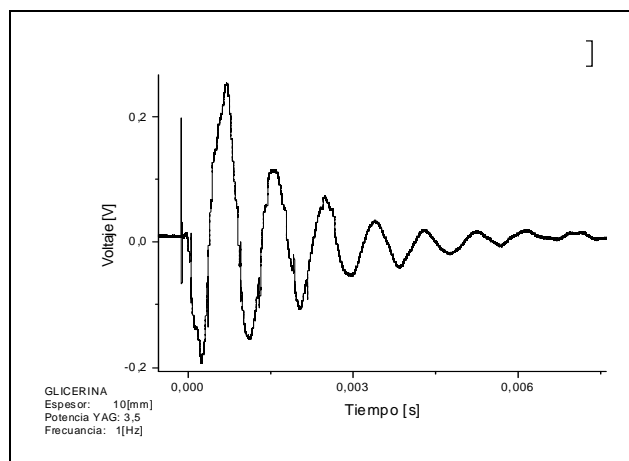


Figura 4-21. Espectro de la onda acústica del impacto del láser en una muestra líquida de $1[\text{cm}^3]$ Glicerina $\text{HOCH}_2\text{-CHOH-CH}_2\text{OH}$ registrado por el micrófono.

Tabla 4-6. Datos de los impactos del láser en las muestras de diferentes concentraciones de KMnO_4 .

Concentración %	Nivel de Energía en el Láser	Voltaje [V]
1 %	4	0,65203
4 %	3	0,050578
8 %	3,5	0,222773
12 %	2,5	0,073164
16 %	4	0,602815

En esta tabla se presentan los valores de voltaje de los picos de mayor amplitud, para diferentes muestras de permanganato de potasio de diferentes concentraciones, para verificar si aparecía alguna variación que se pueda correlacionar con la concentración. De acuerdo a lo encontrado en la *Tabla 4-6*, no se pudo encontrar una relación importante. La señal aparece cuando se produce una evaporación súbita, identificada en la formación de una burbuja, y fue difícil controlar los parámetros para los cuales los líquidos presentaban alguna variación en la señal registrada por el micrófono, es decir, solo se detecta la onda producida por evaporación súbita. La absorción del láser provoca un incremento rápido y muy grande de temperatura, lo que provoca la generación de un gas supercalentado en una o varias burbujas dentro del líquido; esta formación de burbujas genera una onda de presión que viaja hasta el micrófono.

Se obtuvo también el espectro de Fourier de frecuencias y amplitud de estos espectros, y se procedió a calcular el área bajo la curva de todo el espectro FFT, esta información se presenta en la *Tabla 4-7*.

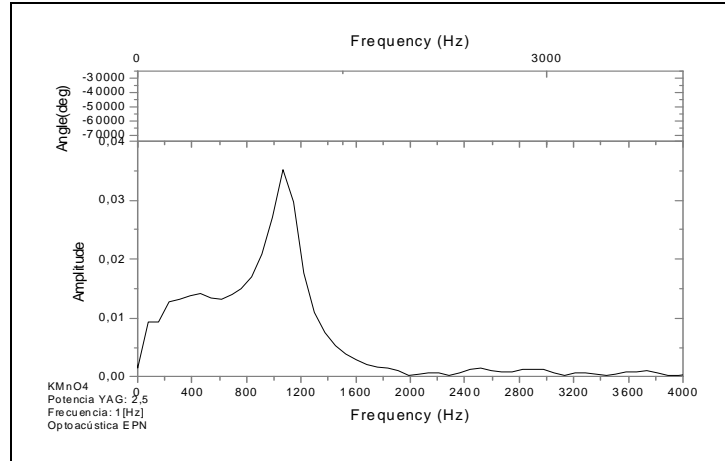


Figura 4-22. Espectro de FFT de la onda acústica del impacto del láser en una muestra líquida de 1[cm³] KMnO₄.

Tabla 4-7. Datos de los impactos del láser en las muestras de diferentes concentraciones de KMnO₄, mostrando el pico de frecuencia y el área.

Concentración %	Nivel de Energía en el Láser	Frecuencia	Voltaje [V]	Área
1 %	4	1068,11	0,10528	243,037
4 %	3	1068,11	0,00818	59,109
8 %	3,5	1068,11	0,03513	108,349
12 %	3,5	1068,11	0,01085	58,359
16 %	4	1068,11	0,08876	216,984

Los resultados presentados en esta tabla muestra que independientemente de las concentraciones, apareció el mismo pico a una frecuencia de 1068.11[Hz] en el espectro de Fourier, pero con diferente amplitud como se observa en la columna del voltaje. También se encontró mediante integración, el área bajo la curva del espectro total. En estos casos se pudo también apreciar que las medidas reportadas no guardan una correlación significativa con algún otro parámetro experimental o del material. Una opción a explorar es la detección de la señal acústica en un sensor PZT por medio del uso de celdas líquidas adecuadas.

4.5 Porosidad

4.5.1 Cálculo de la porosidad mediante un método clásico.

Para validar el potencial del método optoacústico para la determinación de la porosidad de rocas volcánicas, se midió este parámetro usando un método clásico y se comparó con los resultados obtenidos de velocidad y atenuación.

La porosidad se define como la fracción del volumen total de la roca no ocupada por sustancia sólida.

Mediante el uso de la técnica clásica para la determinación de porosidad en rocas sugerido por la International Society of Rock Mechanics Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests (ISRM) [31], realizado con la colaboración del Laboratorio de Resistencia de Materiales del Departamento de Ingeniería Civil de la EPN, se realizaron las pruebas de porosidad a las rocas utilizando el siguiente método.

Seleccionamos probetas de cada uno de los grupos de piedra pómez que se colocaron en una cámara de compresión a presión inversa de $-0,68[\text{Kg}/\text{cm}^2]$ durante 30 minutos. Luego se sumergió la probeta en agua durante 24 horas, al concluirse este tiempo se la introdujo en una cámara con agua a una presión de $300[\text{KPa}]$ por 30 minutos. Se observó que solamente dos de las cuatro probetas se sumergieron. Bajo estas condiciones, y con este método, solamente la porosidad de las muestras que se hundieron pudo ser determinada para comparación.

Se procedió a pesar las muestras en inmersión, estos datos se muestran en la *Tabla 4-8*. Seguidamente, se secaron las superficies de las muestras y se las pesó, para colocarlas luego en una estufa durante 24 horas a 90°C . Como último paso se pesaron las probetas secas. Todos los datos colectados se detallan también en la *Tabla 4-9*. A partir de estos datos, y mediante el uso las *ecuaciones 4-6, 4-7, 4-8* se obtuvieron los datos de porosidad y absorción de agua que se presentan en la *Tabla 4-23*.

Tabla 4-8. Datos de las mediciones realizadas a las probetas de piedra pómez.

Pómez	P. Seco [g]	P. SSS [g]	P. Inmersión [g]
I	3,47	6,94	0,27
II	3,33	6,59	1,05
III	4,03	6,94	-
IV	2,97	5,85	-

Esta tabla muestra los pesos obtenidos con el método clásico, el **Peso seco** corresponde al peso de la muestra completamente libre de agua, y el **Peso de superficie seca**, es el peso de la probeta con la mayor cantidad de agua dentro de ella, pero manteniendo la superficie seca, con lo que respecta al **peso en inmersión**, es el peso de la probeta dentro del agua, para esto no fue posible hacerlo con el grupo de probetas correspondientes a piedra pómez III y IV, debido a que siempre flotaron a pesar de todos los intentos por lograr que el agua ingrese a todos sus poros.

$$P_R = P_{esp/aprt} - P_{esp} \quad \text{Ec. 4-6}$$

$$P_{esp} = \frac{P_{seco}}{P_{SSS} - P_{inm}} \quad P_{esp} \quad \text{Ec. 4-7}$$

$$P_{esp/aprt} = \frac{P_{seco}}{P_{seco} - P_{inm}} \quad \text{Ec. 4-8}$$

Donde, P_R es la porosidad, $P_{esp/aprt}$ es el peso específico aparente, P_{esp} es el peso específico, P_{seco} es el peso de la muestra seca, P_{SSS} peso de la muestra con superficie seca conteniendo agua, y P_{inm} peso de la muestra en inmersión.

Tabla 4-9. Mediciones de Porosidad de rocas de Piedra pómez usando las recomendaciones clásicas según el ISRMC.

Pómez	Porosidad P_R	Absorción de H_2O
I	85,95 %	97,89%
II	56,41 %	99,4%
III	-	-
IV	-	-

Asumiendo una correlación entre el tipo de roca, la velocidad de propagación del sonido y la porosidad [31], podemos aventurar una extrapolación para determinar la porosidad de las piedras pómez III y IV, que no se pudieron medir con el método tradicional. Con tan pocos datos esta correlación puede solamente conjeturarse en base a lo reportado en la literatura, pero lamentablemente, no se puede comprobar o desvirtuar de manera experimental con nuestro trabajo.

Tabla 4-10. Datos extrapolados para las probetas de pómez III y IV

Porosidad	Velocidad
-----------	-----------

Pómez III	11,68 %	3428,31
Pómez IV	43,24 %	2959,45

Esta tabla muestra la extrapolación de la porosidad en las pómez III y IV, basadas como se indicó a la velocidad de la onda acústica en el medio.

4.6 Análisis de Resonancia de la onda acústica en el medio

El análisis de Fourier permite obtener frecuencias características para los sistemas acústicos estudiados. La detección de resonancias geométricas dentro del medio determinadas por la forma y tamaño de las muestras pueden introducir señales resonantes en el espectro, no relacionadas con las propiedades del medio, que es lo que nos interesa y podrían confundir el análisis. Este problema debe ser estudiado para validar el potencial del método optoacústico en la determinación de propiedades físicas de materiales.

Podemos basar un análisis de resonancia mecánica en la concordancia del tamaño de la muestra y el tamaño de la longitud de onda acústica. Para esto, podemos considerar a nuestras muestras cilíndricas como tubos resonantes cerrados. Las siguientes relaciones bien conocidas expresan, partiendo de la función de onda, la frecuencia, la velocidad y la longitud de onda de la onda acústica en el medio.

$$y = A \cdot \text{Sin}(\omega t + \varphi)$$

$$\omega = 2\pi f \quad f = \frac{V}{\lambda}$$

$$y = A \cdot \text{Sin}\left(\frac{2\pi V t}{\lambda} + \varphi\right)$$

$$V \cdot t = x \quad \lambda = \frac{L}{n} \quad n \cong 0, n, 2n, 3n, \dots$$

$$y = A \cdot \text{Sin}\left(\frac{n\pi x}{L} + \varphi\right)$$

$$\lambda = \frac{L}{n\pi}$$

$$c = \frac{L}{n\pi} f$$

$$f = \frac{c}{L} n\pi \quad \text{Ec. 4-9}$$

$$f = \frac{V}{\lambda} \quad \text{Ec 4-10}$$

Aquí, f es la frecuencia, λ la longitud de onda, ω la frecuencia angular, c la velocidad del sonido en el medio, L es el espesor de la muestra y n el número de onda.

En este modelo, la *Ecuación 4-9*, permite encontrar las frecuencias resonantes determinadas por la velocidad del sonido en las muestras, y mediante la *Ecuación 4-10*, se logra determinar la longitud de onda necesaria para que exista resonancia mecánica. Se realizaron cálculos para los cinco primeros armónicos, que por el tamaño de los poros consideramos más importantes. Los resultados de los dos primeros y el quinto armónico se muestran en las *Tablas 4-11, 4-12 y 4-13*, donde claramente se evidencia que en el quinto armónico se encuentra en 63 [cm], por lo cual, se descarta la posibilidad de que dentro de la muestra se hayan ocasionado resonancias mecánicas relacionadas a los espesores de la muestras.

Tabla 4-11, Longitudes de onda en su primer armónico, encontradas en la onda acústica para correlacionarla con la resonancia propia del material.

PRIMER ARMÓNICO				
	Espesor L[m]	Velocidad c[m/s]	Frecuencia f [Hz]	Longitud [m]
ALUMINIO	0,04	4866,35	382,20	12,73
	0,035	4866,35	436,80	11,14
	0,03	4866,35	509,60	9,55
	0,025	4866,35	611,52	7,96
	0,02	4866,35	764,40	6,37
	0,01	4866,35	1528,81	3,18
HIERRO	0,04	4628,59	363,52	12,73
	0,035	4628,59	415,46	11,14
	0,03	4628,59	484,70	9,55
	0,025	4628,59	581,65	7,96
	0,02	4628,59	727,06	6,37
	0,01	4628,59	1454,11	3,18
ACERO	0,04	5124,01	402,43	12,73
	0,035	5124,01	459,93	11,14
	0,03	5124,01	536,59	9,55

	0,025	5124,01	643,90	7,96
	0,02	5124,01	804,88	6,37
	0,01	5124,01	1609,76	3,18

Tabla 4-12, Longitudes de onda en su segundo armónico, encontradas en la onda acústica para correlacionarla con la resonancia propia del material.

SEGUNDO ARMÓNICO				
	Espesor L[m]	Velocidad c[m/s]	Frecuencia f [Hz]	Longitud [m]
ALUMINIO	0,04	4866,35	764,40	6,37
	0,035	4866,35	873,61	5,57
	0,03	4866,35	1019,21	4,77
	0,025	4866,35	1223,05	3,98
	0,02	4866,35	1528,81	3,18
	0,01	4866,35	3057,62	1,59

HIERRO	0,04	4628,59	727,05	6,36
	0,035	4628,59	830,92	5,57
	0,03	4628,59	969,41	4,77
	0,025	4628,59	1163,29	3,98
	0,02	4628,59	1454,11	3,18
	0,01	4628,59	2908,23	1,59

ACERO	0,04	5124,01	804,87	6,36
	0,035	5124,01	919,86	5,57
	0,03	5124,01	1073,17	4,77
	0,025	5124,01	1287,80	3,98
	0,02	5124,01	1609,76	3,18
	0,01	5124,01	3219,51	1,59

Tabla 4-13, Longitudes de onda en su quinto armónico, encontradas en la onda acústica para correlacionarla con la resonancia propia del material.

QUINTO ARMÓNICO				
	Espesor L[m]	Velocidad c[m/s]	Frecuencia f [Hz]	Longitud [m]
ALUMINIO	0,04	4866,35	1911,01	2,55
	0,035	4866,35	2184,01	2,23
	0,03	4866,35	2548,01	1,91
	0,025	4866,35	3057,62	1,59
	0,02	4866,35	3822,02	1,27
	0,01	4866,35	7644,04	0,64

HIERRO	0,04	4628,59	1817,64	2,54
	0,035	4628,59	2077,31	2,23
	0,03	4628,59	2423,52	1,91
	0,025	4628,59	2908,23	1,59
	0,02	4628,59	3635,29	1,27
	0,01	4628,59	7270,57	0,64

ACERO	0,04	5124,01	2012,19	2,54
	0,035	5124,01	2299,65	2,23
	0,03	5124,01	2682,93	1,91
	0,025	5124,01	3219,51	1,59
	0,02	5124,01	4024,39	1,27
	0,01	5124,01	8048,78	0,64

4.7 Fuentes de error.

Los resultados obtenidos en nuestro estudio no son siempre de la mejor calidad y muestran a veces gran variabilidad. Para entender la razón de esto, es necesario identificar las principales fuentes de error. Algunas opciones obvias son las siguientes:

Acoplamiento muestras metálicas – sensor. En los presentes experimentos, al disminuir el espesor de la muestra, el contacto con el sensor PZT desmejora debido a la disminución del peso, principal responsable de la presión de contacto entre estos elementos. Esto provoca una variación aleatoria en la amplitud de la onda de muestra a muestra. La situación mejora significativamente con la adición de un líquido acoplador, como la glicerina, en la interfase.

Acoplamientos piedra pómez – sensor. La situación en este caso es más complicada pues no es posible usar glicerina ni tampoco ningún líquido acoplante, ya que puede ser absorbido por la muestra y cambiar sus propiedades físicas.

Disminución del espesor de la muestra. En este caso, el tamaño del spot varía, y por ende la fluencia de la energía depositada en la superficie de la muestra, creando también una variación en la amplitud de la onda acústica.

Es importante indicar que se colocaron pesas sobre las muestras para tratar de compensar el peso y también mejorar el contacto con el sensor, esto solucionó en gran medida el problema lográndose el registro de espectros con mayor amplitud.

CAPÍTULO V

5.1 *Conclusiones.*

- Una técnica optoacústica de análisis para materiales en estado sólido, y en estado líquido se ha implementado, que provee de información relacionada con las propiedades materiales. En el caso de los líquidos los resultados no son buenos debido al arreglo experimental usado, pero se plantean alternativas para mejorar esta situación.
- Entre los sensores utilizados, los mejores y más confiables resultados se obtienen de un sensor piezoeléctrico de PZT. El micrófono proporcionó una señal demasiado ruidosa, debido a fenómenos de reflexión ocasionados por las paredes de la cámara.
- La técnica optoacústica desarrollada nos ha permitido determinar la velocidad del sonido y el coeficiente de atenuación acústico dentro de muestras homogéneas y no homogéneas. Con nuestro estudio, ha sido posible vislumbrar la posibilidad de utilizar este tipo de mediciones para estudiar la porosidad de materiales de una manera no destructiva como alternativa a métodos tradicionales. Los resultados de materiales homogéneos son relativamente estables para muestras de diferentes tamaños y formas, reflejando, entonces, solamente características del material mismo.
- Los espectros optoacústicos determinados para el sensor piezoeléctrico son específicos de cada material y muestra, lo cual nos provee de una herramienta interesante para caracterizar de manera cualitativa ('fingerprinting') materiales de diferente tipo. Sin embargo, como al realizar el análisis se obtuvieron errores de alrededor del 20%, existen limitaciones a la técnica que deben ser caracterizadas de mejor manera todavía.

5.2 *Recomendaciones y Trabajos Futuros.*

- Se plantea diseñar un sistema que permita manipular de mejor manera las probetas para mantener constantes el tamaño del spot del láser, y por ende, la fluencia de energía entregada en cada impacto láser.

- El acoplamiento entre la muestra y el sensor de PZT resulta crítico y todo esfuerzo debe hacerse para mejorarlo. Una posibilidad es la usar pesas de magnitudes conocidas para sostener el conjunto y conservar la fuerza de contacto sensor–muestra en cada medición.
- El uso de frecuencias de disparo de los pulsos láser más altas permitirá acelerar el análisis, obteniendo al mismo tiempo mejores promedios, sin sacrificar el tiempo de análisis.
- Las señales obtenidas resultaron ser complejas y su estudio mediante el análisis del espectro de Fourier no condujo a conclusiones claras. Por esta razón, el análisis matemático de la señal debe ser afrontado con mayores y mejores herramientas teóricas en el futuro.

BIBLIOGRAFÍA

1. Michael F. Modest, (1993), *RADIATIVE HEAT TRANSFER*, McGraw Hill, Inc, USA
2. Patel and Tam (1981), Pulsed Optoacoustic spectroscopy of condensed matter, *Reviews of Modern Physics*, Vol. 53, No. 3
3. Çengel Yunus (1998), *Thermodynamics*, WCB McGraw-Hill, Boston, USA.
4. Carey, Francis (2000), *Organic Chemistry*, McGraw Hill, Boston, USA.
5. Svanberg S. (2001), *Atomic and Molecular Spectroscopy*, Third Edition, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany.
6. Peterson and Gross (1976), *Microphones and accessories*, Instruction Manual, GenRad, Concord, Massachusetts, USA
7. Stanford Research Systems (2000), *Model SR 810 DSP Lock-in Amplifier*, Sunnyvale CA, USA.
8. Bernal M. T. Rebollo, Capporaletti, Quintian, Raffo, *Estudio Fotoacústico en Medios Porosos*, Laboratorio de Aplicaciones Ópticas. Dto. De Física FIUBA, Buenos Aires Argentina.
9. Bilmes Gabriel et al (2002), *Equipo Láser para Medición de Suciedad en Chapas de Acero*, Conicet-CIC, Universidad Nacional de La Plata, Argentina.
10. Sedra Marcos, (2001), *Novas Aplicações de técnicas fototérmicas para o estudo de interfaces*, Universidad de Sao Paulo, Sao Paulo, Brasil
11. Keith A. Walters (1996), *The LIOAS Technique*, Bowling Green State University.
12. Sinclair Douglas (1975), *GAS LASER TECHNOLOGY*, Holt, Rinehart and Wilson, Inc, New York, USA.
13. Escudero Francisco (1954), *ELECTROACÚSTICA APLICADA*, Editorial DOSSAT, S.A. Madrid España.
14. World Wide Web, Wikipedia 2007 (www.wikipedia.com).
15. Sears Zamansky, (1981), *Física General*. Aguilar Ediciones, Madrid España.
16. Alonso Rojo, (1987), *Física Campos y Ondas*, Addison-Wesley Iberoamericana S.A. Delaware, E.U.A.
17. J.F. Ready, *Effects of High Power Laser Radiation*, Academic Press, New York, 1971.
18. E. Ohmura, I. Fukumoto, Molecular dynamics simulation of laser ablation of fcc metal, *Int. J. Jpn. Soc. Prec. Eng.* 30 (1996) 128–133.

19. Cúpich Miguel, Elizondo Fernando, (2000), *Actuadores Piezoeléctrico, Ingenierías, Enero-Marzo, Vol. III, No.6. Argentina.*
20. H. Vargas, L.C.M. Miranda *Photoacoustic and Related Photothermal Techniques*, Elsevier Science Publishers, pag 92-95.
21. Boyd, I. W., J. I. Binnie, B. Wilson, and M. J. Colles: "Absorption of Infrared Radiation in Silicon", *Applied Physics Letters*, vol. 55, no. 8, pp. 3061-3063, 1984.
22. Irvine, W. M., and J. B. Pollack: "Infrared Optical Properties of Water and Ice Spheres", *ICARUS*, vol. 8, pp. 324-360, 1968.
23. Fratta Daute, Santamarina J., *Wave propagation y Siols: multi mode, Wide-Band Testing in a waveguide Device.*, *Geotechnical Testing Journal*, June 1996.
24. Garavaglia, Mario(1976), *El Laser*, La Plata, Argentina 1976.
25. G. F. Lothian, *Absorption Spectrophotometry*, Adam Hilger 1969.
26. *Manual del láser Ultra CFR: Edición Enero 2004.* Big Sky Laser, DOC00040
27. Hwei P. Hsu (1973), *Análisis de Fourier*, Fondo Educativo Interamericano, S. A. Michigan E.U.A.
28. Alvar (2004), *Equipo Experimental Y Técnicas De Caracterización*, s/n.
29. Buitrago B. (2004), *Ultrasonic velocity and attenuation in carbon steel specimens*, *Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia*. Vol. 27, N° 1, 20 – 25, *Caracas, Venezuela.*
30. Jane Hodgkinson, Mark Johnson, John P. Dakin, (2000), *Comparison of self-referencing techniques for photothermal detection of trace compounds in water.* *Sensors and Actuators B* 67_2000.227–234, Elsevier, *University of Southampton UK.*
31. Franklin J. A. (1977) *Suggested Methods or Determining Water Content, Porosity, Density, Absorption and Related Properties and Swelling and Shrinkability Index Properties.*
32. Ashcroft Neil W (1989), *Solid State Physics*, Holt, Rinehart and Winston, Library of Congress, USA.

ANEXO



Probeta de piedra pómez pesándose en una balanza analítica.



Balanza analítica entregando resultados



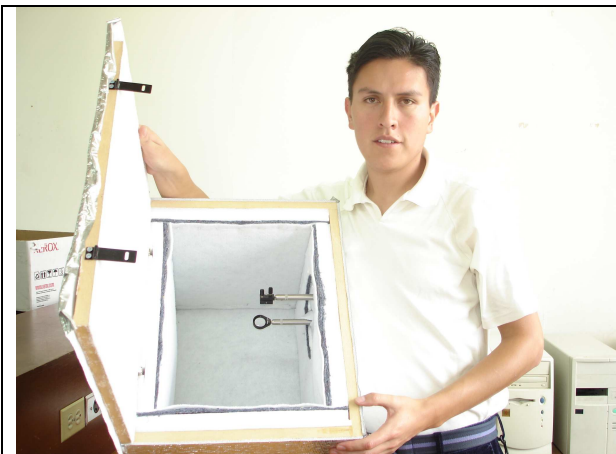
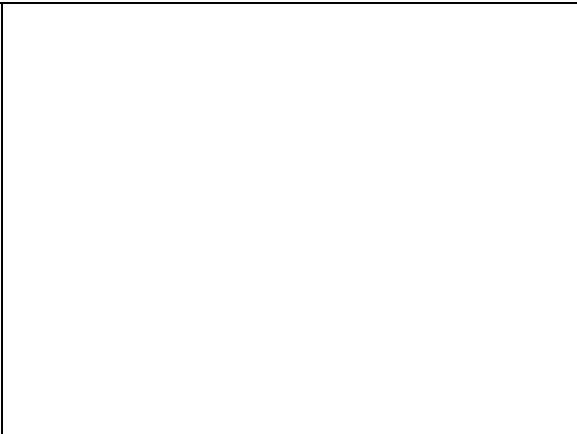
Probetas de piedra pómez dentro de la cámara de compresión con H_2O a una presión de 30[KPa]



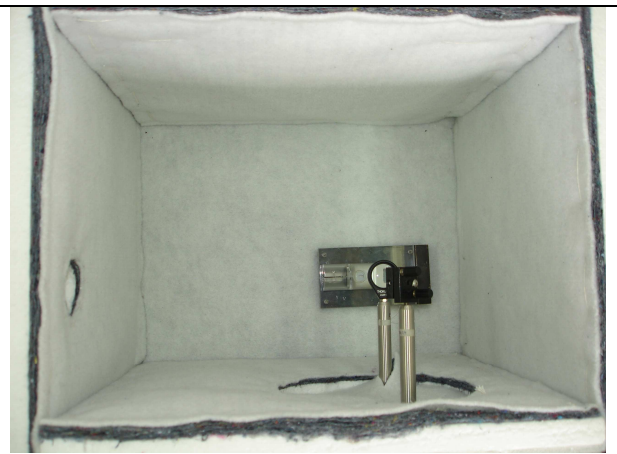
Medición del peso en inmersión de una probeta de piedra pómez



Probeta de piedra pómez en inmersión.



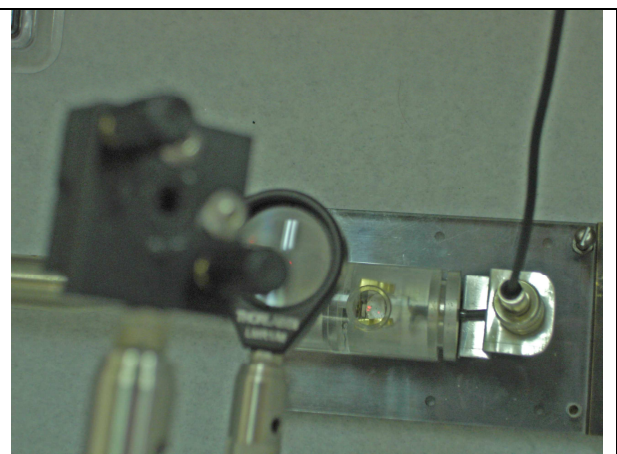
Cámara anecóica con materiales de aislamiento acústico



Arreglo óptico dentro de la cámara anecóica.



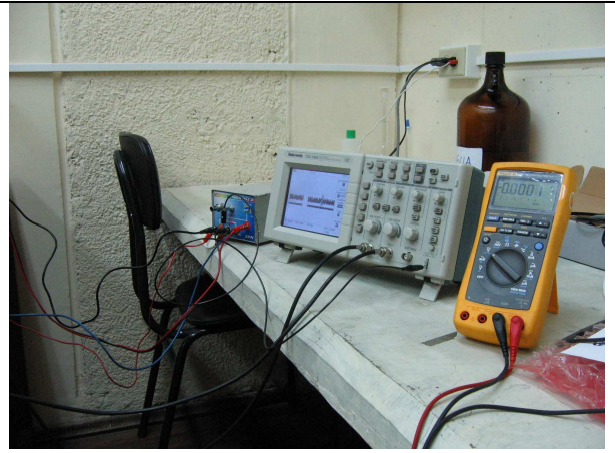
Arreglo óptico dentro de la cámara



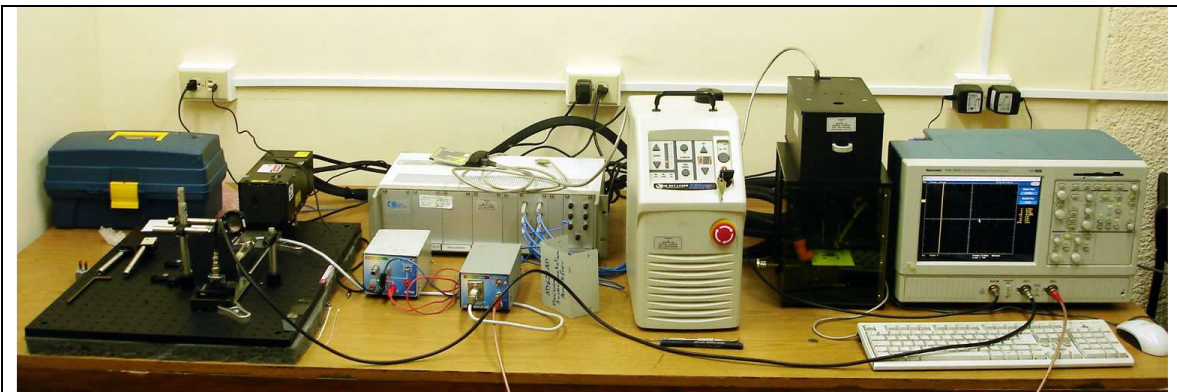
Impacto del láser modulado de 40[Hz] en una muestra.



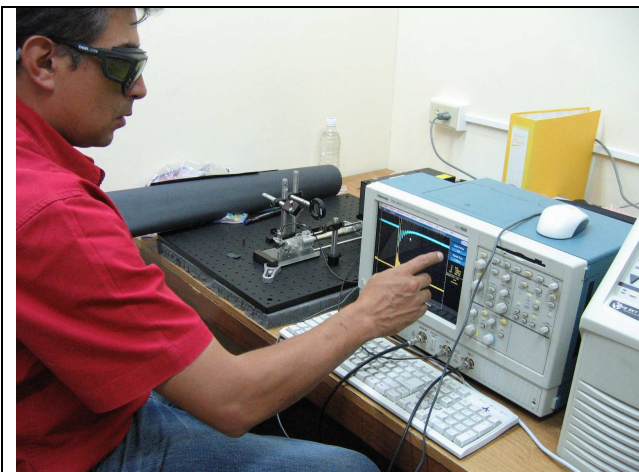
Sistema optoacústico utilizando el láser continuo modulado utilizando el Lock In.



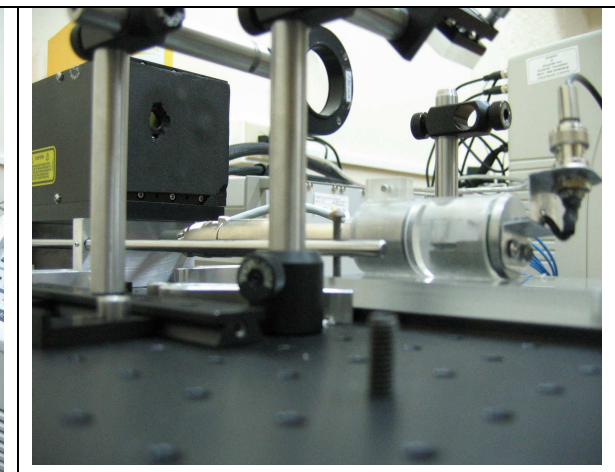
Calibración de equipos.



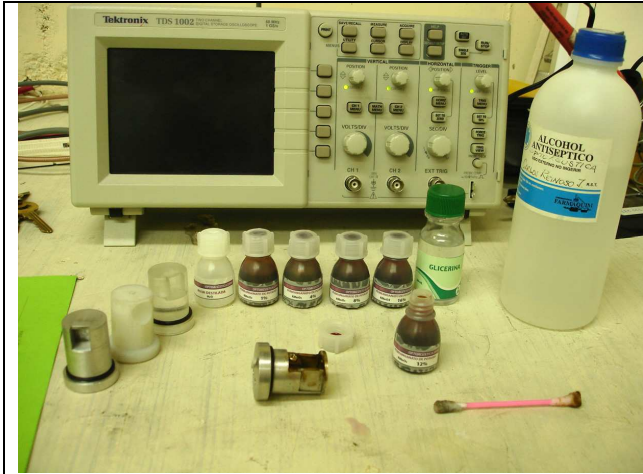
Configuración del sistema para muestras líquidas



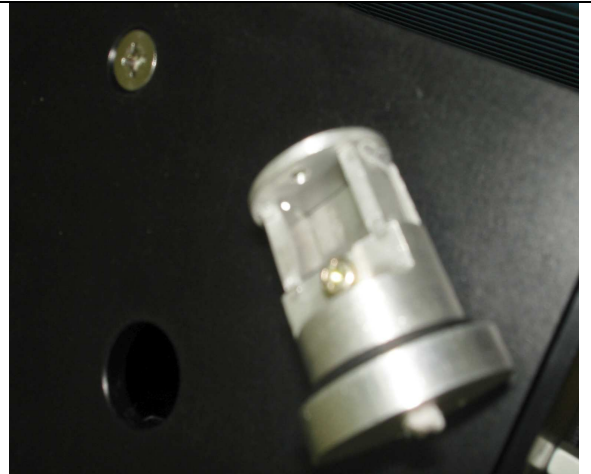
Calibración del equipo



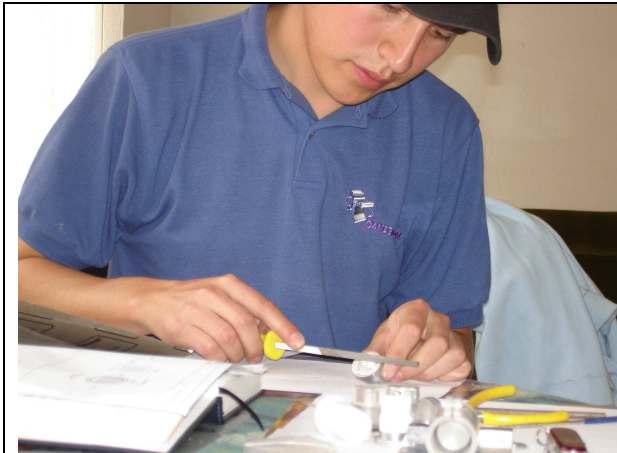
Arreglo óptico



Muestras líquidas de KMnO_4 , Alcohol, glicerina



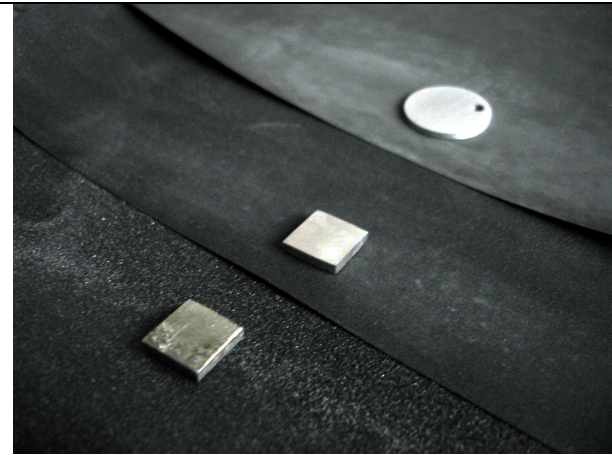
Celda con glicerina despues del disparo



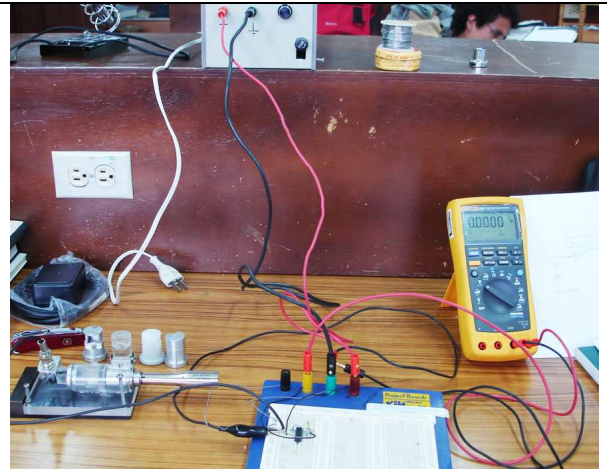
Construcción de la celdas



Pulido de las superficies



Pulido de superficies con diferentes tipos de lijas.



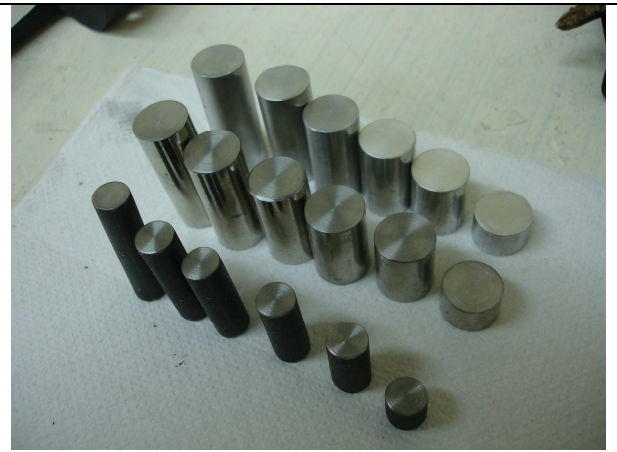
Pruebas del prototipo de amplificador operacional



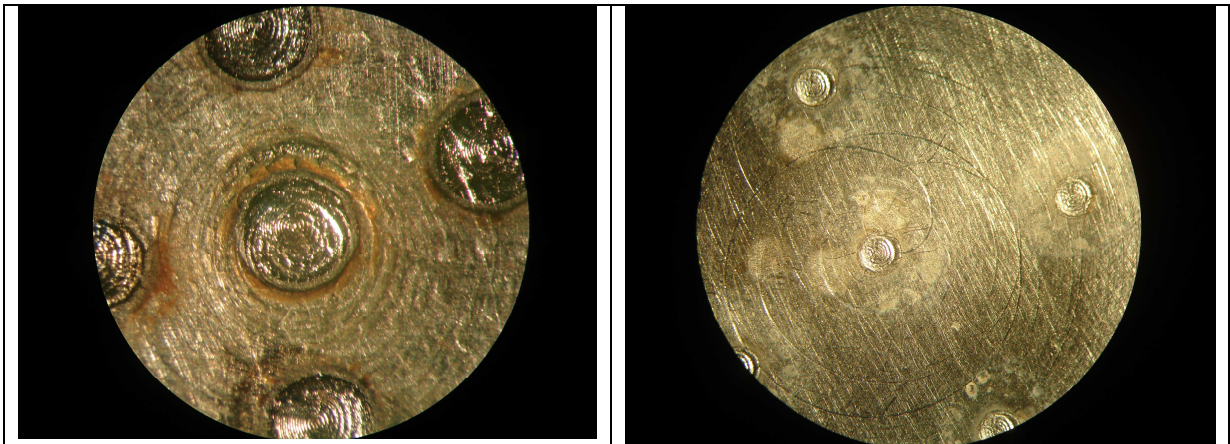
Ubicación de la celda de PZT



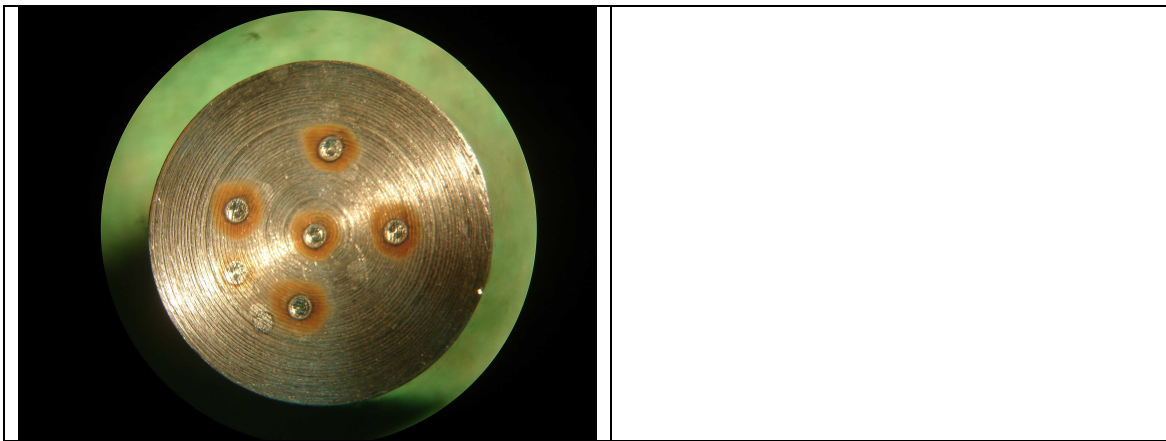
Ajustes al amplificador operacional



Proceso de medición	Muestras metálicas, listas para entrar en el proceso de medición.
---------------------	---



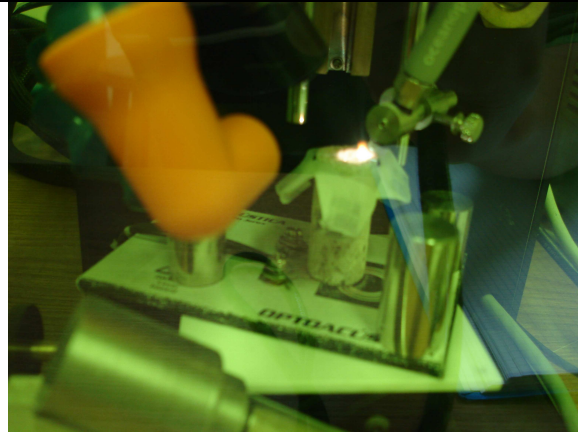
Fotografía de la superficie del Fe después de los disparos	Fotografía en estereo microscopio de la superficie del Al después de los disparos
--	---



Fotografía en estereo microscopio de la superficie del Acero después de los disparos	
--	--



Proceso de medición de las muestras líquidas



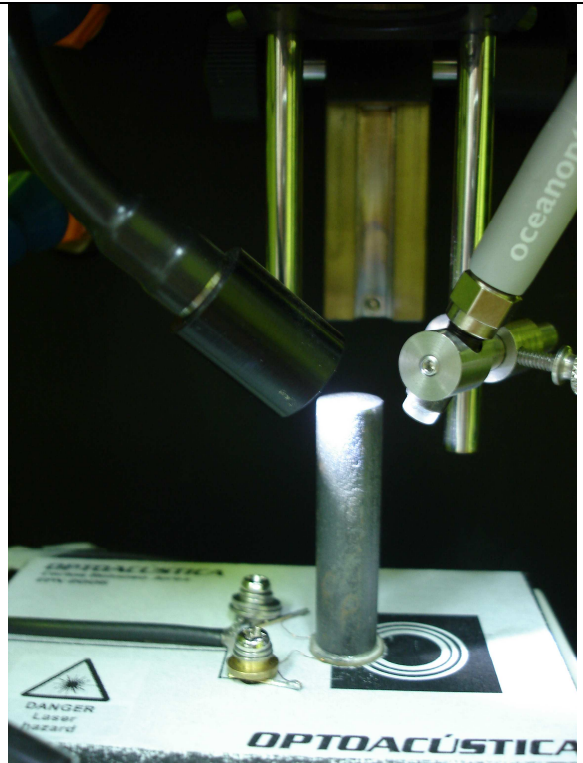
Impacto del pulso láser sobre la superficie de una probeta de piedra pómez



Muestras de piedra pómez listas para entrar en el proceso de medición.



Impactos del láser sobre la superficie de una probeta de Acero en la cámara de medición



Impacto del pulso láser sobre la superficie de una probeta de Fe dentro de la cámara de medición