



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Software de control para un sistema tridimensional de  
medición de intensidad acústica**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**INGENIERO ELÉCTRICO-ELECTRÓNICO**

PRESENTA:

**VÍCTOR JAIME LÓPEZ DELGADO**



**DIRECTORA DE TESIS Dra. Mónica Vázquez Hernández**

MÉXICO D.F. 2014



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

## **DEDICATORIAS**

Gracias a esas personas importantes en mi vida, que siempre estuvieron listas para brindarme toda su ayuda, ahora me toca regresar un poquito de todo lo inmenso que me han otorgado. Con todo mi cariño esta tesis se las dedico a:

Mi abuelo Desiderio Delgado Garcia por formarme como persona y cuidar de mí como si fuera tu propio hijo, donde quiera que estés muchas gracias por siempre escucharme, por tus consejos y por ese amor ya que sin tus enseñanzas hoy no sería la persona que soy.

A mi abuela Isabel González Álvarez por guiarme por el camino correcto para ser una persona de bien y estar siempre conmigo como una madre. Gracias por siempre considerarme y preocuparte por mí como si fuera tu propio hijo, sin ti y mi abuelo Desiderio no tendría muchas de las virtudes que tengo como persona.

A mi familia por el apoyo a lo largo de mi vida estudiantil y en especial a mi madre María Concepción Delgado González por ser el ejemplo de vida que necesito para poder alcanzar todo lo que me proponga.

A mi novia María del Carmen Ochoa Cerón por estar siempre conmigo en las buenas y en las malas, por ser una gran mujer y por compartir conmigo la creación de nuestra propia historia. Gracias por confiar en mí, por compartirme tus experiencias y por motivarme para que siga creciendo en la vida.

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Dra. Mónica Vázquez Hernández por todo su apoyo en la realización de este trabajo, por su tiempo y por la confianza que me brindó durante todo este periodo para poder concluir un ciclo más de mi formación.

Al Ing. Joel Durán Ortega por sus ideas cuando me parecía imposible seguir avanzando en la parte física de este proyecto, sin tu punto de vista me hubiera sido muy difícil concluir satisfactoriamente, gracias por las sugerencias y siempre tener ese tiempo para una consulta de cualquier tema.

Al Dr. Pedro Jesús Acevedo Contla por su apoyo y las facilidades para realizar este trabajo de tesis.

A mis sinodales el M.I. Luis Arturo Haro Ruiz, el Dr. Juan Mario Peña Cabrera y el Ing. Jesús Javier Cortes Rosas por tomarse el tiempo de revisar y poder hacer posible la conclusión de este trabajo.

Agradezco finalmente a la Dirección General de Asuntos del Personal Académico, porque a través de su apoyo a proyectos PAPIIT IN109513 y PAPIIT IT101213 fue posible la compra del equipo empleado en la realización de esta tesis.

# Índice de Contenido

<b>CAPITULO 1</b>	<b>Introducción.....</b>	<b>10</b>
1.1	Motivación .....	11
1.2	El Ultrasonido Aplicado a la Medicina.....	13
1.3	Objetivo General .....	14
1.3.1	Objetivos específicos.....	14
1.4	Organización de la tesis.....	15
<b>CAPITULO 2</b>	<b>Aspectos básicos de ultrasonido .....</b>	<b>17</b>
2.1	Ultrasonido.....	17
2.2	Phantoms .....	19
2.3	Phantoms para ultrasonido.....	20
2.4	Transductores.....	20
2.4.1	Tipos de Materiales Empleados en la Fabricación de un Transductor .....	22
2.4.1.1	PZT (titanato-zirconato de plomo).....	22
2.4.1.2	PVDF .....	23
2.4.2	Transductores ultrasónicos.....	24
2.4.2.1	Clasificación de Transductores ultrasónicos .....	28
2.5	Excitación en Transductores ultrasónicos.....	33
2.6	Hidrófono .....	34
2.6.1	Consideraciones para escoger un Hidrófono .....	35
2.7	Campo ultrasónico .....	37
2.7.1	Campo cercano o zona de Fresnel .....	38
2.7.2	Campo lejano o zona de Fraunhofer .....	39
2.8	Visualización ultrasónica .....	40
2.9	Modos de exploración.....	42

2.9.1	A-Scan.....	42
2.9.2	B-Scan.....	44
2.9.3	C-Scan.....	45
<b>CAPITULO 3 Elementos para la configuración del sistema.....</b>		<b>47</b>
3.1	Introducción .....	47
3.2	Método Pulso –eco .....	49
3.3	Velocidad de propagación.....	51
3.4	Atenuación .....	56
3.5	Absorción.....	58
3.6	Dispersión.....	60
3.7	Labview.....	61
3.7.1	Secuencia y flujo de datos.....	62
3.7.2	Funcionamiento de Labview .....	65
3.7.3	Panel Frontal .....	65
3.7.4	Programación grafica .....	66
3.7.5	Estructuras de Labview .....	68
<b>CAPITULO 4 Pruebas experimentales en el laboratorio.....</b>		<b>70</b>
4.1	Introducción .....	70
4.2	Pruebas acústicas .....	75
<b>CAPITULO 5 Conclusiones.....</b>		<b>93</b>
<b>Referencias y bibliografía .....</b>		<b>95</b>

<b>Anexos.....</b>	<b>98</b>
ANEXO A Hojas de especificaciones de elementos.....	99
ANEXO B Propiedades acústicas de solidos .....	104
ANEXO C Descripción del código.....	110

## Índice de figuras

Figura 2.1	Efecto piezoeléctrico directo e inverso.....	26
Figura 2.2	Esquema y partes de un transductor ultrasónico .....	27
Figura 2.3	Transductor ultrasónico de contacto.....	29
Figura 2.4	Transductor ultrasónico de haz angular .....	30
Figura 2.5	Transductor de 2 elementos.....	31
Figura 2.6	Ejemplo de transductores de inmersión.....	32
Figura 2.7	Transductores ultrasonicos.....	33
Figura 2.8	Hidrófono .....	37
Figura 2.9	Diagrama del haz ultrasónico mostrando las diferentes zonas de intensidad .....	38
Figura 2.10	Representación esquemática del área geométrica (A) y del área de radiación efectiva (ERA).....	40
Figura 2.11	Ejemplo A-Scan .....	43
Figura 2.12	Ejemplo B-Scan .....	45

Figura 2.13	Ejemplo C-Scan .....	46
Figura 3.1	Diagrama General del sistema .....	48
Figura 3.2	Técnica Pulso-eco.....	50
Figura 3.3	Representación gráfica de pulso-eco.....	50
Figura 3.4	Movimiento de ondas longitudinales y transversales .....	52
Figura 3.5	Comportamiento de ondas longitudinal y transversal entre 2 medios a) 2 líquidos b) un líquido y un sólido .....	53
Figura 3.6	Ejemplo de potencias para atenuación.....	57
Figura 3.7	Programación de control de flujo en un lenguaje convencional .....	63
Figura 3.8	Flujo de datos en Labview.....	64
Figura 3.9	Panel frontal.....	66
Figura 3.10	Ejemplo de programación gráfica .....	67
Figura 3.11	Paleta de control y paleta de funciones .....	68
Figura 4.1	Menú de tipo de barrido .....	70
Figura 4.2	Menú de opciones para 1 eje.....	71
Figura 4.3	Menú de opciones para 2 ejes .....	72
Figura 4.4	Menú de opciones para 3 ejes .....	73



Figura 4.5	Menú de opciones para configuración del osciloscopio .....	74
Figura 4.6	Ejes de exploración .....	76
Figura 4.7	Ejes de referencia en el objeto bajo prueba. ....	77
Figura 4.8	Sistema para caracterización acústica .....	78
Figura 4.9	Sistema de posicionamiento tridimensional.....	79
Figura 4.10	Objeto bajo prueba de acero .....	80
Figura 4.11	Objeto bajo prueba de acilico.....	81
Figura 4.12	Formas de onda obtenidas para adquisición en el eje X con objeto bajo de prueba de acero .....	82
Figura 4.13	Formas de onda obtenidas para adquisición en el eje X con objeto bajo de prueba de acrílico.....	83
Figura 4.14	Formas de onda obtenidas para cada adquisición en Y del plano XY con la escalera de acero .....	84
Figura 4.15	Formas de onda obtenidas para adquisición en el plano XY con escalera de acero .....	85
Figura 4.16	Formas de onda obtenidas para adquisición en el plano XY con escalera de acrílico .....	86
Figura 4.17	Formas de onda obtenidas para cada adquisición en Z del plano XZ con la escalera de acero .....	87
Figura 4.18	Formas de onda obtenidas para adquisición en el plano XZ con escalera de acero .....	88

Figura 4.19	Formas de onda obtenidas para cada lectura en Z con la escalera de acrílico.....	89
Figura 4.20	Formas de onda obtenidas para adquisición en el plano XZ con la escalera de acrílico .....	90
Figura 4.21	Formas de onda obtenidas para adquisición en 3 ejes (XYZ) con objeto de acero .....	91
Figura 4.22	Formas de onda obtenidas para adquisición en 3 ejes (XYZ) con objeto de acrílico.....	92
FIGURA A. 1.	Panel principal.....	112
Figura A. 1b	Diagrama de bloques del panel principal. a) Sección 1. Creación del archivo de configuración.....	113
Figura A. 1c.	Diagrama de bloques del panel principal, Sección 2, Manejo de los eventos para las diferentes opciones del panel .....	114
Figura A.2	a) Cuadro de dialogo guardar. b) Diagrama de bloques del cuadro de dialogo guardar.....	115
Figura A .3	Diagrama de bloques que se encarga de guardar los datos adquiridos. ....	116
Figura A. 4 a)	Tipo de barrido .....	117
Figura A 4 b)	Diagrama de bloques del panel “Tipo de barrido” .....	118
Figura A 5ª	Panel de configuración .....	119
Figura A 5b)	Diagrama de bloques del panel “Configuración”, .....	120

# **CAPITULO 1**

## **Introducción**

Dentro de las líneas de investigación del Departamento de Ingeniería de Sistemas Computacionales y Automatización (DISCA) del Instituto de Investigaciones en Matemáticas Aplicadas y en Sistemas (IIMAS) de la UNAM, se encuentran las de procesamiento de señales e Imagenología ultrasónica. En el grupo de trabajo existen diversos proyectos que requieren de la adquisición, procesamiento y despliegue de señales ultrasónicas. Así como del diseño, la construcción y caracterización de transductores ultrasónicos, siendo estos últimos una herramienta fundamental para la realización de esta línea de investigación.

El objetivo principal de este trabajo de tesis es realizar un software de control para un sistema de posicionamiento XYZ conformado por guías lineales (tornillos sinfín) controlados por motores a pasos. La interface máquina - usuario se programó con el objetivo de controlar de manera amigable y eficiente el sistema y hacer posible la adquisición de las señales ultrasónicas para su adquisición, procesamiento, despliegue y posterior análisis.

El software posibilita graficar los datos (a) adquisición en un eje: Amplitud de la señal en Volts en función del tiempo, (b) un plano en dos dimensiones (adquisición en 2 ejes) o un volumen (adquisición en 3 ejes). Estas secuencias de datos pueden ser adquiridas usando un hidrófono, un transductor ultrasónico, con dos transductores ultrasónicos (uno emitiendo y otro recibiendo) o bien un solo transductor en modo pulso-eco.

## **1.1 Motivación**

Para analizar distintos materiales y realizar exploraciones en el cuerpo humano sin tener la necesidad de penetrarlo se suelen utilizar los ensayos no destructivos (END). Este tipo de ensayos aplican distintos métodos físicos que permiten la exploración interna de ambientes sin modificar sus propiedades; de forma que, tras el análisis que verifica su estado, se puede determinar los elementos existentes en dicho ambiente. Esta inspección es muy importante puesto que su objetivo primordial es la detección de heterogeneidades internas en las mismas (grietas, inclusiones o poros), cuya presencia modifica las propiedades físicas de un material.

Existen diversas técnicas para la aplicación de los END como son la radiología, técnicas ultrasónicas, líquidos penetrantes, partículas magnéticas, métodos visuales y métodos de inducción electromagnética. Entre las distintas técnicas no destructivas, el ultrasonido es la más común, debido a su fácil manejo; además de tener múltiples aplicaciones que no exigen de grandes requisitos hardware ni software.

Se denominan END a los ensayos que tienen como objetivo la evaluación del estado de los materiales sin que queden afectadas las propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales de los mismos y que se realizan sin producir daños que afecten a su funcionalidad.

Existe una gran cantidad y variedad de técnicas de END enfocadas a examinar los materiales utilizados para determinar la presencia, localización y tamaño de discontinuidades ya que estas pueden perjudicar la operabilidad de piezas en servicio o que sean nuevas. Entre las más comunes se encuentran la inspección visual, radiografía,

líquidos penetrantes, partículas magnéticas, pruebas ultrasónicas o corrientes inducidas.

El beneficio de una inspección está anunciado por su rentabilidad, que depende esencialmente de cuatro factores: sensibilidad, velocidad, cobertura y fiabilidad.

- Sensibilidad: La sensibilidad se define como el tamaño mínimo de defecto que puede ser detectado de forma correcta. Su cálculo depende del tipo de material que se está examinando y del objetivo de la inspección, aunque también hay que tener en cuenta la precisión con la que se caracterizan los defectos.

- Velocidad: Para estimar la velocidad del ensayo hay que considerar el tiempo empleado en realizar una inspección y el tiempo que se invierte en la interpretación de los datos. El tiempo de exploración queda determinado principalmente por la técnica no destructiva utilizada, ya que existen técnicas de inspección más rápidas que otras.

- Cobertura: La cobertura se define como el porcentaje inspeccionado del material objeto de estudio al concluir el ensayo. Lograr una cobertura del 100% depende de la geometría de la pieza, de su ubicación y de la técnica utilizada, ya que existen procedimientos que limitan la cobertura al permitir únicamente la exploración de una superficie de la pieza.

- Fiabilidad: La habilidad de la inspección se define generalmente a través de la probabilidad de detección y la probabilidad de falsa indicación, estos factores están relacionados entre sí. Una de las formas de mejorar el rendimiento de la inspección es

reducir la velocidad de ensayo que se puede conseguir reduciendo la cobertura de inspección que, a su vez, reduce el costo de la inspección.

## **1.2 El Ultrasonido Aplicado a la Medicina**

Desde sus primeros tiempos a estas dos últimas décadas con las nuevas aplicaciones informáticas y el desarrollo de nuevas tecnologías, el ultrasonido se ha convertido en una herramienta indispensable en muchos campos de la medicina. Los ultrasonidos son más conocidos en la actualidad en el terreno del diagnóstico médico.

Sin embargo, el ultrasonido tiene múltiples aplicaciones entre las que se destacan la navegación subacuática y la detección de defectos en el ámbito industrial, el uso más temprano de la ultrasónica en el campo de la medicina estuvo grandemente confinado a sus aplicaciones en terapia más que en el diagnóstico, utilizando sus efectos de calentamiento y de disrupción de tejidos animales.

La capacidad de los ultrasonidos de alta intensidad fue reconocida en la década de los años 20 en los tiempos de Langevin cuando notó la destrucción de bancos de peces en el mar y la inducción de dolor en la mano cuando se situaba en un tanque de agua irradiado con ultrasonido de alta intensidad.

En los años 40 los ultrasonidos fueron evolucionando hacia una herramienta microquirúrgica. William Fry en la Universidad de Illinois y Russell Meyers en la Universidad de Iowa efectuaron craneotomías y usaron ultrasonidos para destruir parcialmente los ganglios basales en pacientes con Parkinson. También es usada extensivamente en la terapia física y de rehabilitación [1].

### **1.3 Objetivo General**

Realizar un software de control para un sistema tridimensional de medición de intensidad acústica, explorando el espacio a medir por medio de un transductor ultrasónico, para la reconstrucción de datos adquiridos por este por medio de un osciloscopio y una PC.

#### **1.3.1 Objetivos específicos**

Objetivo específico 1:

Estudio del estado del arte de sistemas de exploración

Objetivo específico 2

Estudio del estado del arte de transductores

Objetivo específico 3

Crear la interface para el usuario

1. Adquirir, graficar, procesar y analizar las señales ultrasónicas
2. Modos de despliegue de la información

- a. A-scan
- b. B-scan (planos bidimensionales) del campo acústico en tiempo real
- c. C-scan Mapas de campos acústicos (Volumen)

## **1.4 Organización de la tesis**

En el capítulo 1 se presenta una breve introducción en la que se describe la complejidad del problema planteado y la conveniencia del planteamiento de esta tesis así como el objetivo general de la misma.

Además se indican los motivos que justifican esta investigación así como los objetivos que se han marcado para esta tesis.

En el capítulo 2 se presentan aspectos básicos en las que se fundamenta esta tesis, es decir se tiene una recopilación de los temas más relevantes relacionados con la temática de esta investigación, esto con el fin de dar una explicación para poder entender los temas más relevantes para el desarrollo de esta tesis como son: ultrasonido, phantoms, los elementos físicos para poder llevarse a cabo así como la representación final de las adquisiciones que se realizaran.

En el capítulo 3 se describe a detalle todo lo referente al sistema automatizado diseñado para este trabajo, desde los elementos para poder realizar el software de control hasta los elementos necesarios para su aplicación.



Primeramente se da una explicación de la técnica que se va a utilizar para adquirir los datos que mostrarán el resultado final, posteriormente se describen algunos conceptos que son de gran importancia para el método y finalmente se explica la plataforma en la que se hará el diseño así como la forma en que está estructurada dicha plataforma para poder realizar el programa.

En el capítulo 4 se describe paso a paso el procedimiento que se tomó para realizar las pruebas con el software, se muestran las ventanas de este y se menciona la manera en que fue posible adquirir datos para su posterior reconstrucción en 3 métodos de exploración (A Scan, B Scan, y C Scan).

En el capítulo 5 se exponen las principales conclusiones de la tesis de acuerdo al objetivo planteado y a los resultados obtenidos.

## **CAPITULO 2**

### **Aspectos básicos de ultrasonido**

#### **2.1 Ultrasonido**

Los ultrasonidos son ondas acústicas, es decir son ondas mecánicas que requieren un medio elástico o visco elástico para propagarse, mediante el movimiento armónico de sus moléculas. Se llaman ondas ultrasónicas porque su frecuencia de vibración está por encima de la frecuencia de las ondas audibles para el ser humano, se consideran audibles las frecuencias en el intervalo de 20Hz a 20 KHz. Existen numerosas aplicaciones que utilizan las vibraciones ultrasónicas en medios sólidos, líquidos o gaseosos. Algunas de estas aplicaciones utilizan ondas ultrasónicas (UT) de alta potencia (mayor energía por unidad de área) para transformar el medio que se irradia. En medicina el UT de potencia se usan con fines terapéuticos (hipertermia, litotricia), en la industria para activar procesos de naturaleza física (filtros, aglomerantes) y en química (aceleración de reacciones, limpieza de piezas) [2].

Entre las aplicaciones más populares de las ondas de sonido (ultrasonido) se encuentra la ecocardiografía, es decir la obtención de imágenes de las estructuras internas del cuerpo humano. Las ondas ultrasónicas son producidas por la estimulación eléctrica de un material piezoeléctrico y pueden ser dirigidos a un área específica del cuerpo. Cuando se irradia un medio, un órgano del cuerpo humano por ejemplo, las ondas ultrasónicas viajan a través de distintas capas de tejido, cuando estas señales se propagan de un medio a otro, como por ejemplo: cuando viajan a través de una interface piel- hueso, tejido- grasa o líquido amniótico- tejido, etc. experimentan un cambio en la densidad, lo que produce que una parte de la señal se refleje y parte de la señal continúe viajando a través del nuevo medio. A la vibración acústica que es

reflejada debido al cambio de impedancia acústica y que al llegar a la cara del transductor emisor, se convierte en un pulso eléctrico, se le denomina eco-. La información contenida en los ecos recibidos nos permite determinar la posición del tejido que a dando lugar a los ecos, la amplitud de la señal nos permite determinar la atenuación del medio y la forma de onda del eco la dispersión o el scattering. Se pueden observar imágenes formadas al capturar y procesar varias secuencias de ecos (matrices de datos) en forma estática o dinámica, usando para ello un sistema posicionador manual o automatizado.

Parte de la utilidad del ultrasonido se deriva del hecho de que las ondas de ultrasonido de baja potencia son inocuas para los tejidos humanos, a diferencia de los rayos X o de radiaciones ionizantes debido a que son procedimientos invasivos. Sin embargo, no hay ejemplos conocidos de daño en los tejidos de la ecografía convencional. La ecografía se utiliza con mayor frecuencia para examinar fetos en el útero con el fin de determinar el tamaño, la posición o anormalidades. Otras de las aplicaciones del ultrasonido en el diagnóstico médico son la obtención de imágenes de órganos como el corazón, el hígado, los riñones, la vesícula, los senos, etc. También se puede utilizar para diagnosticar tumores y para guiar a ciertos procedimientos, tales como biopsias con aguja, la introducción de tubos de drenaje, y la cirugía correctiva intrauterina.

Las imágenes producidas por el ultrasonido no son tan precisas como las imágenes obtenidas mediante tomografía axial computarizada (CAT Computerized Axial Tomography) o la resonancia magnética (MRI). Sin embargo, el ultrasonido se utiliza en muchos procedimientos, ya que es rápido y relativamente barato y no ha conocido riesgos biológicos cuando se utiliza dentro del rango de diagnóstico.

## 2.2 Phantoms

Los phantoms son materiales de prueba empelados para simular los parámetros acústicos de tejido biológico para facilitar el estudio de la interacción del haz ultrasónico con el tejido [3].

En la siguiente tabla se muestran los parámetros acústicos que para algunos tejidos biológicos.

Tejido	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Velocidad [m/s]	Impedancia Acústica [kg/m <sup>2</sup> /s]	Absorción [dB/cm]
Hueso	1380–1810	1500–3700	3.75–7.38·10 <sup>6</sup>	20
Cerebro	1030	1516- 1575	1.56–1.62·10 <sup>6</sup>	0.85
Grasa	921	1400-1490	1.29–1.37·10 <sup>6</sup>	0.60
Riñón	1040	1564-1640	1.62–1.71·10 <sup>6</sup>	1
Hígado	1060	1540-1640	1.70–1.74·10 <sup>6</sup>	2.3–3.2
Pulmón	400	470-658	0.19–0.26·10 <sup>6</sup>	7
Músculo	1070-1270	1508-1630	1.61–2.07·10 <sup>6</sup>	2-11
Piel	1200	1498*	1.80·10 <sup>6</sup>	

Tabla 2.1 Propiedades Acústicas del Tejido para 37°C, a una Frecuencia de 1 MHz

### **2.3 Phantoms para ultrasonido**

En la ultrasonografía para diagnóstico, entiéndase como phantoms los cuerpos de prueba utilizados para imitar el tejido humano, posibilitando así, el estudio de la interacción del tejido con el ultrasonido. Los cuerpos de prueba pueden ser clasificados en dos tipos: el primero busca imitar las propiedades acústicas del tejido tales como la velocidad de propagación de la onda, los coeficientes de atenuación y retro dispersión, etc.; Entre otros objetivos los phantoms se emplean para aproximarse a la apariencia sonográfica de los tejidos a través de volúmenes que simulan órganos y/o quistes. Los phantoms usualmente son hechos de materiales con propiedades acústicas muy próximas de aquellas mostradas por el tejido, por ejemplo el glicerol en la porción adecuada simula velocidad de propagación, el agar mezclado con grafito en polvo simula consistencia y atenuación, micro esferas de cristal simulan centros dispersores, geles de silicato de magnesio, y espumas de poliuretano.

Por otro lado, los phantoms utilizados para simular quistes o determinadas masas de tejido, pueden ser ecos génicos o transparentes al ultrasonido. El material eco génico (produce dispersión) consiste en general, de harina para empanizar (o similar) suspendida en gelatina, o bien en polvo de carburo de silicio suspendido en agua [4].

### **2.4 Transductores**

Se pueden definir a los transductores como dispositivos que convierten una señal física de entrada en una señal de tipo eléctrico, generalmente intensidad, voltaje o impedancia, de forma que sea una réplica lo más perfecta posible de la magnitud física [5].

Las funciones de un transductor son (1) detectar la presencia, el cambio de magnitud y la frecuencia de la señal de entrada en cuestión y (2) proveer una señal eléctrica para que aun cuando sea procesada adecuadamente por un dispositivo que lea la señal, este nos entregue datos exactos de lo que está cambiando en el sistema.

Debido a que hay diferentes tipos de señales como las mecánicas (por ejemplo acústicas), térmicas, magnéticas, eléctricas, ópticas y químicas el transductor que se seleccione para ser utilizado debe de ser compatible con la aplicación a la que va a ser destinada, en esta selección existen 7 áreas de interés.

1 - Rango de operación

2 – Sensibilidad

3 – Respuesta en frecuencia y frecuencia resonante

4 – Compatibilidad (ambiental, biológica, etc.)

5 – Precisión

6 – Uso y robustez

7 – Tipos de elementos eléctricos requeridos y limitaciones de respuesta en frecuencia

En este trabajo se hará énfasis en los transductores ultrasónicos.

## **2.4.1 Tipos de Materiales Empleados en la Fabricación de un Transductor**

### **2.4.1.1 PZT (titanato-zirconato de plomo)**

Estos piezoeléctricos están formados por cerámicas ferro eléctricas que son polarizadas Eléctricamente en forma longitudinal y transversal para producir haces ultrasónicos en ambas caras [6].

El material PZT (titanato-zirconato de plomo) se desarrolló alrededor de 1952 en el Instituto de Tecnología de Tokio, se compone de dos elementos químicos: plomo y zirconio combinado con el compuesto químico titanato. Este tipo de material se forma bajo temperaturas extremadamente altas.

El PZT, es la cerámica piezoeléctrica más utilizada hoy en día. En general, las cerámicas piezoeléctricas son la opción preferida debido a que son fuertes físicamente, químicamente inertes y relativamente baratas de fabricar. Además, pueden ser fácilmente adaptadas para satisfacer los requisitos de un propósito específico. El PZT cerámico tiene un uso reservado, ya que tiene una mayor sensibilidad y una mayor temperatura de funcionamiento de otras cerámicas piezoeléctricas.

El PZT cerámico se utiliza en una amplia variedad de aplicaciones. Polvos cerámicos PZT blandos se utilizan normalmente cuando un acoplamiento alto y / o sensibilidad elevada de carga son importantes, como en el flujo o sensores de nivel, para aplicaciones de ultrasonido como NDT / NDE (Nondestructive Testing /Evaluation), o para las

inspecciones precisas de automoción, estructurales o productos de la industria aeroespacial. Las características del material son una constante dieléctrica alta, sensibilidad alta, alta densidad con una estructura de grano fino, un punto de Curie alta, y una respuesta de frecuencia limpia, libre de ruidos.

#### **2.4.1.2 PVDF**

El PVDF (polyvinylidene difluoride) es un polímero, el cual tiene un gran uso en la industria, debido a su flexibilidad y a que su impedancia acústica es muchísimo más baja que la de las cerámicas piezoeléctricas, tiene bajo acoplamiento electromecánico y constantes de pérdidas dieléctricas que disminuyen con la frecuencia.

Algunas de las aplicaciones que existen para este tipo de material, son: la foto acústica y NDT.

El PVDF es conocido por sus propiedades piezo y piro eléctricas, por lo que ha sido ampliamente usado en aplicaciones de censado, algunas de la cuales están relacionadas con pruebas NDT y monitoreo de emisión acústica. Hay un número importante de investigaciones que se han centrado en el uso del PVDF en un amplio rango de aplicaciones como la determinación del peso, la presión y la detección de imágenes, esto debido a que el PVDF es flexible y puede ser utilizado en varias configuraciones, lo vuelve ideal para el censado de vibraciones estructurales [6].



### 2.4.2 Transductores ultrasónicos.

Los Transductores ultrasónicos se fabrican para una variedad de aplicaciones y es necesario prestar cuidadosa atención a la selección de este para que sea el adecuado para la actividad que se vaya a desarrollar.

En pruebas de ultrasonido, se debe tomar una decisión acerca de la frecuencia del transductor que se utilizará. El cambio de la frecuencia cuando la velocidad del sonido se fija dará lugar a un cambio en la longitud de onda del sonido. La longitud de onda del ultrasonido utilizado tiene un efecto significativo sobre la probabilidad de detectar una discontinuidad. Una regla general es que una discontinuidad debe ser mayor que la mitad de la longitud de onda para tener una oportunidad razonable de ser detectado.

La sensibilidad y la resolución son dos términos que se utilizan a menudo en la inspección ultrasónica para describir la capacidad de una técnica para localizar defectos.

**Sensibilidad:** Es la capacidad de localizar pequeñas discontinuidades. La sensibilidad aumenta generalmente con mayor frecuencia (longitudes de onda más cortas).

**Resolución:** Es la capacidad del sistema para localizar discontinuidades que están muy juntas dentro del material o localizados cerca de la superficie de la pieza. Resolución también aumenta generalmente al aumentar la frecuencia.

La frecuencia de onda también puede afectar a la capacidad de una inspección de manera adversa. Por lo tanto, la selección de la frecuencia óptima de inspección a menudo implica el mantenimiento de un equilibrio entre los resultados favorables y

desfavorables de la selección. Antes de seleccionar una frecuencia de inspección, se debe considerar la estructura del material y el espesor de este, así como el tipo de la discontinuidad, tamaño, y la probable ubicación de esta.

Cabe mencionar, que una serie de variables afectará la capacidad del ultrasonido para localizar defectos. Estos incluyen la longitud del impulso, voltaje aplicado al cristal, propiedades del cristal, material de soporte, diámetro de transductor, y la circuitería del receptor del instrumento [7].

El elemento activo de la mayoría de los transductores ultrasónicos es una cerámica piezoeléctrica, la cual al aplicarle una señal eléctrica senoidal, vibra y genera ondas mecánicas de la misma frecuencia que la señal eléctrica aplicada simultáneamente, si se aplica una excitación por vibración mecánica, será generada una señal eléctrica, cuya frecuencia es igual a la de la excitación [8].

En La figura 2.1 se ilustran ambos procesos.

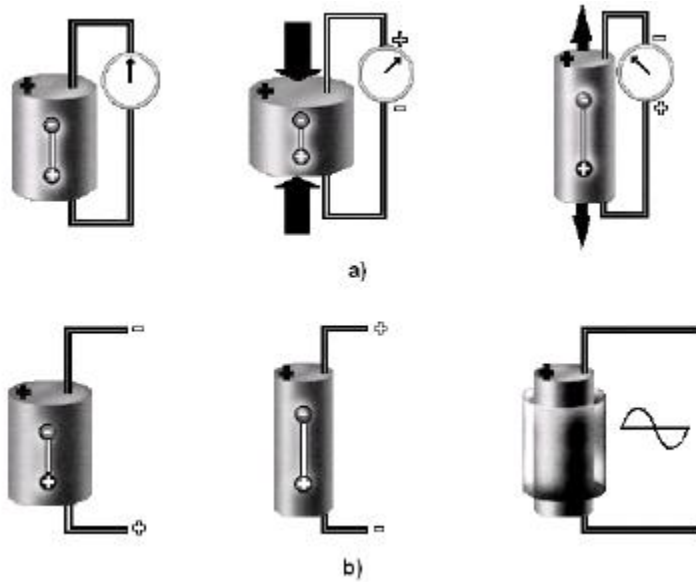


Figura 2.1 a) Efecto piezoeléctrico directo resultante de una fuerza externa. La polaridad de carga eléctrica depende de la dirección y sentido de la fuerza aplicada. B) El efecto piezoeléctrico inverso bajo la influencia de un campo eléctrico externo, las dimensiones del cuerpo varían con el cambio en el voltaje.

En la figura 2.2 podemos observar la manera en la que está constituido un transductor ultrasónico, las cuales son las siguientes: Elemento activo o piezoeléctrico, Backing o contramasa y Capa de acoplamiento.

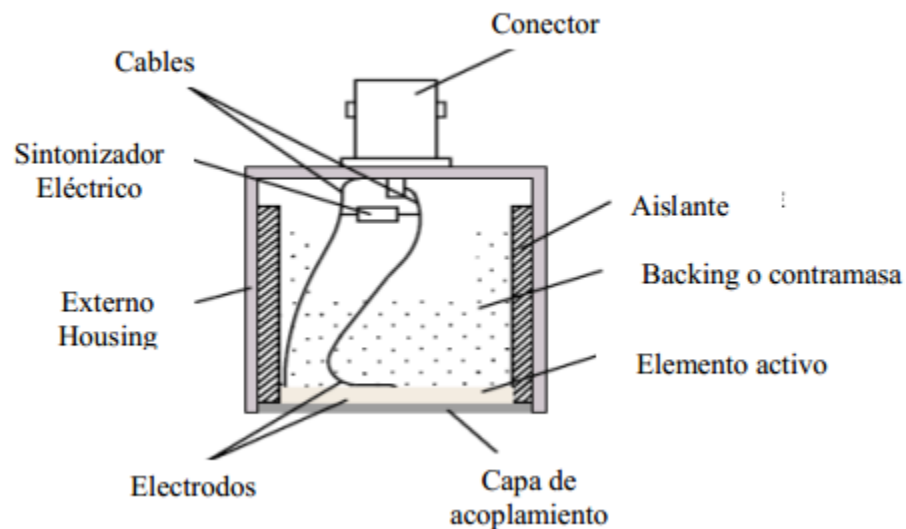


Figura 2.2 Esquema y partes de un transductor ultrasónico

El elemento activo o elemento piezoeléctrico es el encargado de realizar la conversión electromecánica, el cual está conectado eléctricamente al exterior a través de contactos soldados en los electrodos que cubren al elemento piezoeléctrico. Junto a dicho elemento, se encuentran otros elementos no activos que determinan las características temporales de emisión y/o recepción. Estos elementos son el llamado “Backing” o contramasa y capa de acoplamiento.

Estos sistemas mecánicos pasivos tienen como función realizar una asimetría de emisión, lo cual se entiende de la siguiente manera. La placa piezoeléctrica vibra, emitiendo energía mecánica en ambos sentidos. Las aplicaciones prácticas, solo utilizan la emisión en una sola de las caras. Con este fin se coloca la contramasa en la cara posterior que tiene como objetivo fundamental absorber la energía mecánica en esa

dirección y detener la oscilación de la cerámica, originando un transductor con mayor resolución.

La capa de acoplamiento por su parte tiene dos funciones, proteger el elemento activo y asegurar una mayor transferencia de energía, esto último se logra fabricándola de un material con una impedancia acústica intermedia entre el elemento activo y el material sobre el cual se espera utilizar el transductor [9].

#### **2.4.2.1 Clasificación de Transductores ultrasónicos**

Los transductores se clasifican en grupos de acuerdo a la aplicación.

**Transductores de contacto:** Se utilizan para las inspecciones de contacto directo, y por lo general son manipulados manualmente. Tienen elementos protegidos en una carcasa resistente para soportar contacto deslizante con una variedad de materiales. Estos transductores tienen un diseño ergonómico de modo que sean fáciles de agarrar y mover a lo largo de una superficie. A menudo tienen placas de desgaste reemplazables para alargar su vida útil. Materiales de acoplamiento de agua, grasa, aceites, o materiales comerciales se utilizan para eliminar el espacio de aire entre el transductor y el componente que se está inspeccionado [10].

En la figura 2.3 se muestra un ejemplo de transductor de contacto

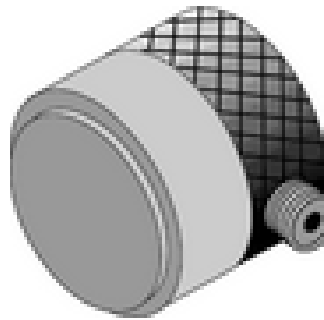


Figura 2.3 Transductor ultrasónico de contacto

Dentro de este tipo de transductores ultrasónicos de contacto a continuación se describen 2 ejemplos.

**Transductores de haz angular (Angle beam transducers):** Este se utiliza normalmente para introducir una onda refractada en el material de ensayo. Los transductores se pueden comprar en una variedad de ángulos fijos o ajustables en las versiones donde el usuario determina los ángulos de incidencia y refracción. En las versiones de ángulo fijo, el ángulo de refracción que está marcado en el transductor es exacto solo para un material particular, que suele ser de acero. El recorrido del sonido en ángulo permite que el haz de sonido que se refleja de la pared trasera para mejorar la detección de los defectos en los alrededores de las zonas soldadas. También se utilizan para generar ondas de superficie para uso en la detección de defectos en la superficie de un componente.

En la figura 2.4 se muestra este ejemplo de transductor ultrasónico de contacto

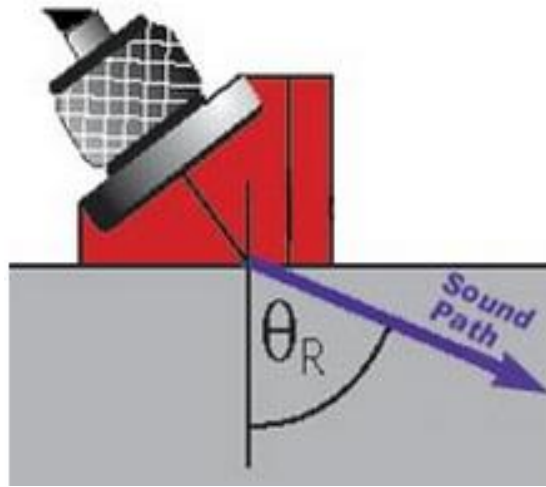


Figura 2.4 Transductor ultrasonico de haz angular

**Transductor de dos elementos (Dual element transducers):** Contienen dos elementos que funcionan de forma independiente en una sola carcasa. Uno de los elementos transmite y el otro recibe la señal ultrasónica. Los elementos activos pueden ser elegidos para sus capacidades de envío y recepción para proporcionar un transductor con una señal más limpia, y los transductores para aplicaciones especiales, Los transductores de dos elementos son especialmente adecuados para la toma de mediciones en aplicaciones en las que los reflectores están muy cerca de la superficie, estos transductores son muy útiles al realizar mediciones de espesores de materiales. Los dos elementos están inclinados uno hacia el otro para crear un haz cruzado en el material de ensayo.

En la figura 2.5 se puede observar cómo está compuesto este tipo de transductor.

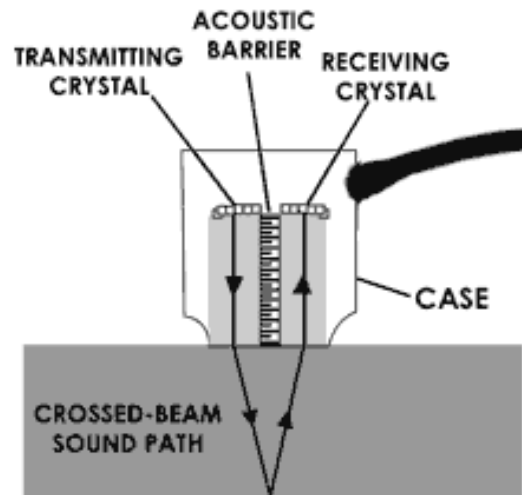


Figura 2.5 Transductor de 2 elementos (Dual element transducer)

**Transductores de inmersión:** No entran en contacto con el componente. Estos transductores están diseñados para funcionar en un ambiente líquido y todas las conexiones son herméticas. Los transductores de inmersión por lo general tienen una capa de adaptación de impedancia que ayuda a conseguir más energía del sonido en el agua y, a su vez, en el componente que está siendo inspeccionado. Los transductores de inmersión pueden ser comprados cilíndricamente enfocados o la lente esféricamente enfocada. Un transductor enfocado puede mejorar la sensibilidad y la resolución axial mediante la concentración de la energía del sonido a un área más pequeña. Este tipo de transductores se utilizan típicamente dentro de un tanque con agua en aplicaciones de exploración.

La figura 2.6 muestra los transductores de inmersión.





Figura 2.6 Ejemplo Transductores de inmersión

En la figura 2.7 se puede observar dos de las formas en las que un transductor puede focalizar la energía, es decir puede enfocar un sólo punto o en un plano.

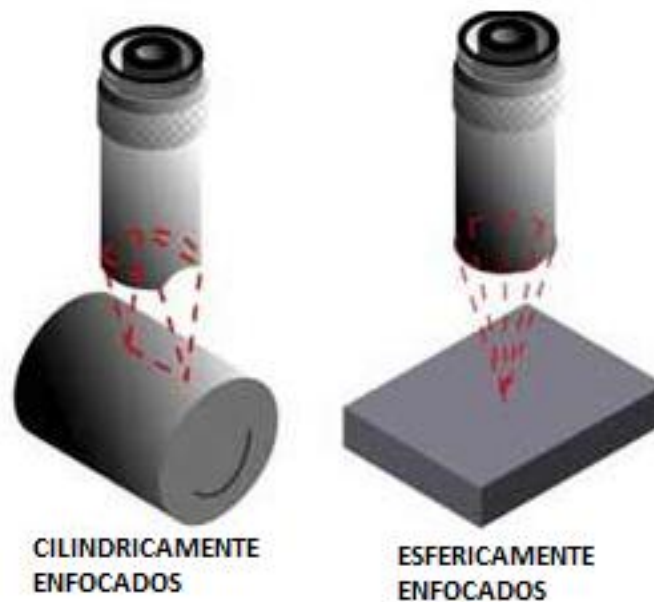


Figura 2.7 Transductores ultrasónicos

## 2.5 Excitación en Transductores ultrasónicos

Existen diferentes tipos de excitación para transductores ultrasónicos, estos pueden ser

**Excitación onda continua:** Esta consiste en excitar el transductor ultrasónico todo el tiempo que dure el ensayo.

**Excitación pulsada:** Se excita el transductor durante pequeños intervalos de tiempo.

**Excitación multipulsada** – para generar trenes de pulsos cuya duración, frecuencia (fija o variable) y amplitud se pueden controlar electrónicamente. Para ciertas aplicaciones se generan trenes de pulsos codificados, y mediante técnicas de procesamiento digital de señales se facilita la recuperación de la máxima resolución axial manteniendo al mismo tiempo una buena relación señal ruido (RSR).

## 2.6 Hidrófono

Es un transductor diseñado para trabajar bajo el agua para detectar vibración mecánica (ondas acústicas) dentro de esta. La mayoría de los hidrófonos se basan en un transductor piezoeléctrico que genera electricidad cuando se somete a un cambio de presión. Los materiales o transductores piezoeléctricos pueden convertir una señal de sonido en una señal eléctrica, ya que el sonido es una onda de presión.

Un hidrófono puede "escuchar" al sonido en el aire, pero será menos sensible debido a su diseño, ya que el agua tiene una mayor densidad que el aire.

Es deseable que los hidrófonos tengan una respuesta de frecuencia plana, es decir, la misma cantidad de voltaje por cada cantidad de excitación acústica independientemente de la frecuencia. Una de las maneras más fáciles de lograr esto es montar un material piezoeléctrico sobre un soporte con una impedancia acústica igual a la de esta y luego terminar en una alta impedancia eléctrica. Dadas estas condiciones de contorno, el piezoeléctrico emitirá una tensión que es básicamente proporcional a la entrada de la presión acústica.

Esta técnica funciona bastante bien, y de hecho da lugar a la respuesta de frecuencia deseada hasta que el piezoeléctrico comienza a tener una resonancia. De hecho, si uno realmente tiene una impedancia de apoyo y el enlace entre el piezoeléctrico y el respaldo es suficientemente delgada, uno puede tener una respuesta razonablemente plana hasta aproximadamente  $1.5 f_0$ , donde  $f_0$  es la longitud de onda media del espesor (frecuencia de resonancia) del elemento piezoeléctrico [11].

### 2.6.1 Consideraciones para escoger un Hidrófono

Para escoger el hidrófono adecuado existen una serie de consideraciones que deben de tomarse en cuenta para una adecuada selección.

- 1- **Sensibilidad vs área efectiva:** al igual que con la mayoría de los sensores, la amplitud del voltaje es proporcional al área del elemento activo. Los dispositivos más sensibles tienen una mayor área de detección, por lo tanto, menor resolución espacial y ángulo de aceptación más estrecho con una frecuencia más específica (o longitud de onda).
- 2- **La interferencia con el campo acústico:** En general, es preferible utilizar un sensor que no afecte el parámetro que se está midiendo. Sin embargo, la elección de hidrófono depende de la naturaleza del campo acústico. Los campos de ondas continuas son las más afectadas por las grandes estructuras que reflejan en el ambiente, por lo que es preferido el tipo de “aguja” teniendo en cuenta que el hidrófono puede tener una estructura de apoyo que refleja. Campos pulsados son más tolerantes debido a las reflexiones se pueden discriminar por el tiempo en que arriban, por lo que los tipos de membrana pueden ser aceptables.

- 3- **Fragilidad:** Los hidrófonos son intrínsecamente frágiles, especialmente cerca del elemento sensor, ya que su objetivo es tener una alta sensibilidad a las presiones transitorias. Los diferentes modelos tienen diferentes grados de protección en función de la construcción.
  
- 4- **Inmersión:** El agua es un disolvente relativamente agresivo, e incluso migra a través de plásticos. Por esta razón se recomienda que el hidrófono debe de ser sacado del tanque cuando no se esté utilizando.
  
- 5- **Tamaño:** Los hidrófonos de aguja proporcionan el tamaño más pequeño, seguido por el diseño de la cápsula, y tipos de membranas, estos son muy grandes en comparación con el elemento de detección.
  
- 6- **Costo:** En general, los dispositivos de membrana son más costosos, seguido por los de cápsula y luego los hidrófonos de aguja. Dentro de cada tipo, los dispositivos más pequeños son los más difíciles de realizar y por lo tanto el más caro.

En la figura 2.8 se puede apreciar un ejemplo de Hidrófono



Figura 2.8 Hidrófono

## 2.7 Campo ultrasónico

El estudio del campo acústico ha sido de gran importancia en los ámbitos donde la radiación acústica este presente. Cuando un transductor vibra, genera ondas acústicas en la superficie vibrante que producen un campo acústico dependiente de las características del transductor. Con el objetivo de conocer o verificar los intervalos en que es operable un transductor ultrasónico, se realiza una caracterización, es decir se determinan las dimensiones del campo acústico que emite. La resolución de la exploración depende de la aplicación del transductor. El campo acústico depende de muchos parámetros tales como: los modos de vibración, la frecuencia, las dimensiones del transductor (el diámetro), etc.

El haz ultrasónico producido por el transductor no es totalmente recto. Si se mide la intensidad del haz sonoro a varias distancias del transductor se puede observar que es posible distinguir tres zonas diferentes, tal y como se muestra en la figura 2.9. Estas

zonas son conocidas como: Zona muerta, Zona de campo cercano o Zona de Fresnel y Zona de Campo Lejano o Zona de Fraunhofer.

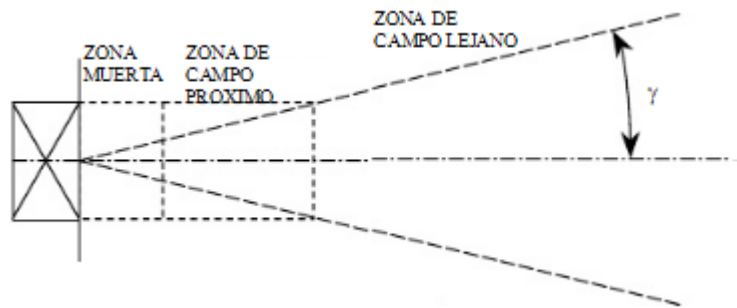


FIGURA 2.9 Diagrama del haz ultrasónico mostrando las diferentes zonas de intensidad

### 2.7.1 Campo cercano o zona de Fresnel

En esta zona existe una ligera convergencia del haz ultrasónico y en ella se producen fenómenos de interferencia que originan una distribución no homogénea de la intensidad, con máximos y mínimos localizados unos junto a los otros. El campo cercano se extiende desde la superficie del transductor hasta el máximo de intensidad más distante, punto más allá del cual el haz tiene una intensidad más uniforme (campo lejano).

### 2.7.2 Campo lejano o zona de Fraunhofer

En esta zona hay una ausencia casi total de fenómenos de interferencia de forma que el haz ultrasónico es homogéneo y la intensidad disminuye gradualmente conforme aumenta la distancia hasta el transductor, además el haz ultrasónico se hace divergente disminuyendo más rápidamente la intensidad del mismo.

La longitud del haz está determinada por la longitud de onda (a mayor longitud de onda menor es la longitud del campo cercano) y el diámetro de la cabeza del transductor, cuanto mayor sea el diámetro mayor será la longitud del campo cercano y menor es el ángulo de divergencia del haz, por este motivo los aplicadores de terapia cuya área de radiación efectiva (ERA) es menor de  $5\text{cm}^2$  son menos efectivos para usos terapéuticos.

El área de irradiación efectiva ERA (Effective Radiation Area), es más pequeña que el área geométrica del cabezal del transductor.

En la figura 2.10 observamos la representación esquemática del área geométrica A y del área de radiación efectiva



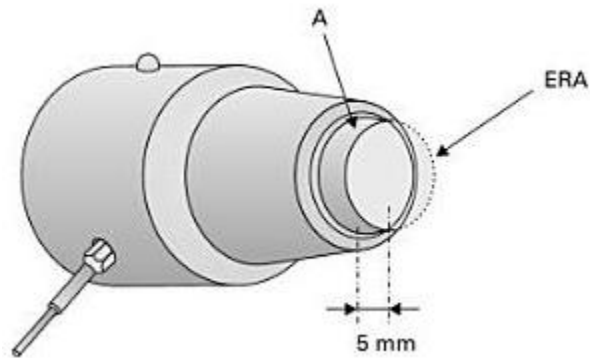


Figura 2.10 Representación esquemática del área geométrica (A) y del área de radiación efectiva (ERA)

## 2.8 Visualización ultrasónica

En la obtención de imágenes ultrasónicas de estructuras internas en medicina y en aplicaciones industriales, el factor que incide más directamente en la precisión de la información obtenida es la resolución ecográfica a lo largo de todas las profundidades de exploración. Dicha resolución puede optimizarse a través de diseños específicos tanto de los dispositivos de transducción en banda ancha como de los sistemas electrónicos necesarios para la generación de los impulsos de frecuencia y voltaje altos utilizados para su excitación. Ello propicia la consecución de impulsos acústicos de muy corta duración y con la intensidad suficiente para obtener un margen dinámico adecuado en las señales ecográficas resultantes.

La visualización del interior de estructuras opacas mediante pulsos ultrasónicos, en sectores como diagnóstico médico, control industrial y ensayos no destructivos de materiales, requiere continuas innovaciones para mejorar la calidad de las imágenes obtenidas. De esta forma se amplían los materiales y piezas sobre los que se aplica esta técnica de inspección basada en las señales de eco resultantes.

Los parámetros que más inciden en la calidad y precisión de estas inspecciones son:

- La amplitud de la señal eco-gráfica en respuesta a una excitación eléctrica de muy corta duración del transductor: Esta nos determina el margen dinámico en las señales recibidas por un sistema concreto y por ello nos delimita la máxima profundidad de la exploración para unas condiciones de excitación eléctrica y del medio inspeccionado determinadas.

- La duración temporal de la citada señal ecográfica: Esta indica la capacidad del sistema de visualización para discriminar entre ecos sucesivos por reflexiones en grietas, porosidades o variaciones de densidad próximas. De ella depende la resolución axial resultante. Por ello se recurre en estas aplicaciones a transductores de banda ancha.

## **2.9 Modos de exploración**

Cualquier discontinuidad en el medio de propagación de un pulso ultrasónico genera una reflexión en sentido contrario que se desplaza de nuevo a la entrada y que se llama el eco del impulso lanzado. El pulso-eco se compone de (1) el tiempo transcurrido entre el lanzamiento del pulso y el eco recibido, y (2) la intensidad / energía del eco recibido. Hay diferentes maneras en que estos datos se pueden presentar para la visualización / medición.

Los tres formatos más comunes conocidos en el mundo de Pruebas no invasivas por sus siglas en inglés NDT (Non-Destructive-Testing) son conocidos como presentaciones A-scan, B-scan y C-scan. Cada uno de estos modos de presentación proporciona una manera diferente de visualizar la información y evaluar la región de material que está siendo inspeccionado.

### **2.9.1 A-Scan**

A-Scan o modo de Amplitud de presentación de los datos muestra la cantidad de energía ultrasónica recibida como una función del tiempo. La cantidad de energía recibida se traza a lo largo del eje vertical (eje Y) y el tiempo transcurrido (que puede estar relacionado con el tiempo que la energía tarda en viajar dentro del material) a lo largo del eje horizontal (eje X).

Lo que distingue al A-Scan es el método de visualización, el cual puede ser considerado como visualización en amplitud, al inicio del recorrido, el transductor continúa recibiendo ecos de las superficies cercanas, esta perturbación es conocida como el “golpe inicial” y sirve para marcar la superficie frontal del cuerpo.

El primer eco significativo recibido es el reflejo de la frontera anterior después de que el eco ha regresado al transductor, esto puede ser calculado como:

$$t_1 = (2/c_1)l_1$$

Donde  $t_1$  es el tiempo que tarda en ir y venir el eco,  $c_1$  es la velocidad de fase del tejido y  $l_1$  es la profundidad del tejido, la velocidad de fase del tejido en cada medio en teoría debe ser conocido pero en muchos instrumentos se asume que la velocidad de fase tiene un valor parecido al que tiene el agua y el musculo, es decir 1540 m/s. Lo cual equivale a 13  $\mu$ s por cada centímetro de profundidad en un viaje redondo.

En la figura 2.11 podemos observar un ejemplo de A-Scan.

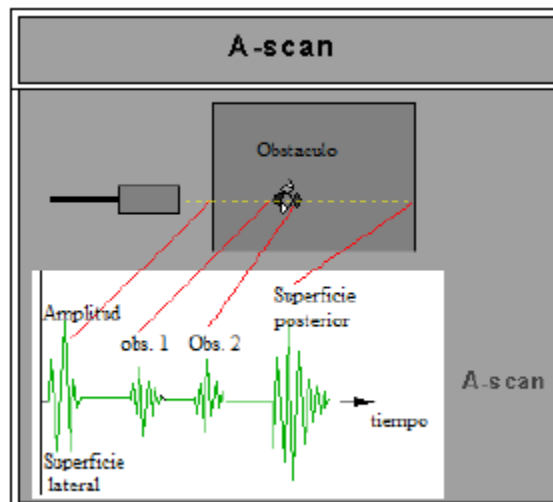


Figura 2.11 Ejemplo A-Scan

### 2.9.2 B-Scan

La presentación más habitual de la información ecográfica bidimensional en los sistemas de visualización ultrasónica para diagnóstico médico es la conocida como Modo B (B-Scan). Su obtención requiere la realización de un barrido del haz ultrasónico sobre el plano de interés, para lo cual basta con asegurar un desplazamiento lineal del mismo sobre la superficie de la muestra o tejido a estudiar.

El B-scan se produce típicamente mediante el establecimiento de un disparo (trigger) de la puerta (gate) por el A-scan. Cada vez que la intensidad de la señal es lo suficientemente grande como para activar el gate, un punto se produce en el B-Scan. La gate se activa por el reflejo del sonido desde la pared posterior de la muestra y por reflectores más pequeños dentro del material.

Por lo tanto cada reflexión es representada por un punto y la intensidad o la energía de la reflexión es representado por el resplandor del punto.

La imagen producida por el B-Scan es una vista en dos dimensiones de región escaneada es presentada como un corte a través del cuerpo. En instrumentos más recientes, la intensidad del brillo de los puntos se puede diferenciar como una escala de grises que puede aumentar la confianza e interpretación de las imágenes.

La figura 2.12 muestra el resultado de una exploración de este tipo

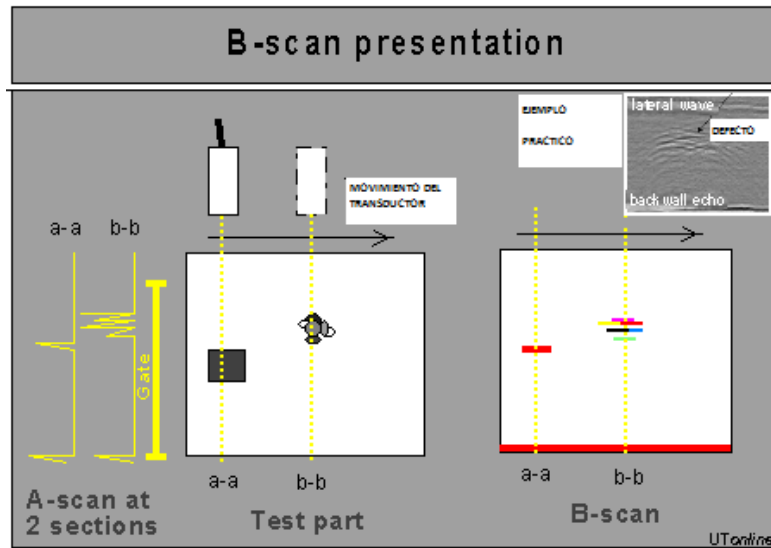


Figura 2.12 Ejemplo B-Scan (Modo B)

### 2.9.3 C-Scan

El C-Scan es una visualización de las señales en tres dimensiones. Esta representación reúne varios B-Scan, permitiendo localizar en volumen los defectos del material.

Esta representación nos proporciona una imagen de las características que reflejan y dispersan el sonido dentro y sobre las superficies de la pieza de ensayo.

Dos características del tejido pueden obtenerse de la información del C-Scan, primero, comparando la amplitud del pulso recibido con la amplitud del pulso transmitido, se encuentra una medición de la atenuación total durante el camino, esta atenuación incluye las pérdidas de la interfaces encontradas en el camino. Segundo, una comparación entre el tiempo del pulso transmitido y el pulso recibido llamado "tiempo

de vuelo” obtenemos como resultado los datos necesarios para calcular la velocidad de fase del tejido en el camino. El mayor éxito obtenido con el C-Scan se basa en la homogeneidad de la anatomía obtenida [6].

La figura 2.13 muestra el resultado obtenido con un C-Scan.

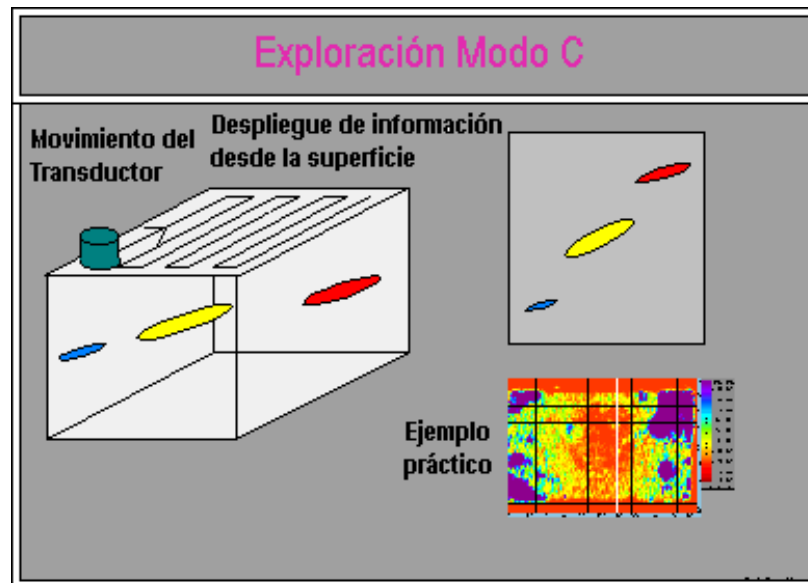


Figura 2.13 Ejemplo C-Scan (Modo C)

## **CAPITULO 3**

### **Elementos para la configuración del sistema**

#### **3.1 Introducción**

El objetivo principal de este trabajo es elaborar un software que controle el movimiento de un sistema posicionador de 3 ejes (XYZ), para realizar barridos en 1, 2 y 3 dimensiones, procesar y desplegar los datos adquiridos a través de un osciloscopio provenientes de un transductor ultrasónico.

En la figura 3.1 se puede observar el sistema que se requiere controlar, este consta de 2 etapas: La etapa de control del posicionador y la etapa de adquisición de los datos.

Para la configuración experimental se utilizó el montaje disponible del posicionador, así como la instrumentación que compone el sistema para la caracterización del campo de radiación de los transductores.

La etapa de control está conformada una tarjeta de entradas y salidas digitales, la etapa de potencia y los motores a pasos. Para mandar las señales de control hacia los motores se empleó una tarjeta National Instrument, modelo NI USB-6501 de 24 canales digitales. Debido a que los motores a pasos empleados necesitan una alimentación de 600mA es necesario añadir una etapa de potencia a las señales que entrega la tarjeta, para generar la suficiente corriente y poder controlar los motores a pasos, los cuales son unipolares de 200 pasos por vuelta y se alimentan con 12V. Adicionalmente al control del posicionador también le es necesario un dispositivo para adquirir los datos, para esto se emplea un osciloscopio de fósforo digital Tektronix (DAQ) (ver anexo A) [12].



En la figura 3.1 se muestra una representación general del sistema empleado

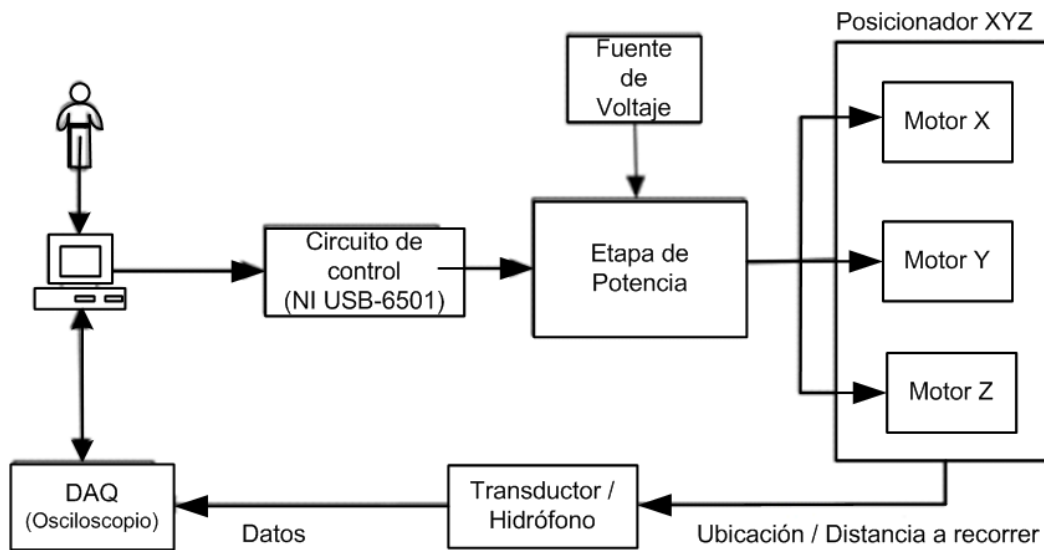


Figura 3.1 Diagrama general del sistema

El método empleado para la adquisición con los transductores es llamado pulso-eco el cual se explicara a continuación así como la plataforma en la que se desarrolló el programa.

### **3.2 Método Pulso –eco**

Es la técnica más utilizada en inspecciones ultrasónicas y consiste en la generación de pulsos cortos y de alta frecuencia que se aplican a un transductor piezoeléctrico, el cual transforma esta energía eléctrica en vibraciones mecánicas, las cuáles se transmiten por el material que se analiza en una dirección determinada, llegando hasta alguna frontera límite del material (superficie de separación de dos medios) o hasta alguna discontinuidad del material (cambio de impedancia acústica), entonces el pulso ultrasónico sufre una reflexión debido a un cambio de impedancia acústica, es decir de manera análoga a la luz cuando esta impacta una superficie con índice de refracción distinto a uno, parte de la energía luminosa se refleja y parte continua su viaje (refracción), en el caso de la señal acústica la señal que se refleja y regresa al transductor emisor se llama eco y la señal que se genera inicialmente y continua su viaje a través de otros medios se llama pulso. Las reflexiones o ecos del pulso se deben a defectos en el material o al eco producido cuando el pulso se refleja en el extremo del material. Este último eco puede ser medido cuando las condiciones físicas de atenuación del material y la energía de los ultrasonidos permiten el viaje de ida y vuelta del pulso de un extremo a otro del material. Como resultado final, las señales recibidas en el sensor contienen información de ruido de fondo producido por la microestructura granular del material, de defectos localizados en su interior y el eco producido por el extremo del material.

El transductor ultrasónico transforma la energía mecánica de la vibración en un pulso eléctrico, el cual es amplificado y presentado en la pantalla de un osciloscopio como una deflexión vertical de un trazo horizontal que es una función lineal del tiempo.

En la figura 3.2 se muestra una la técnica pulso eco en el transductor

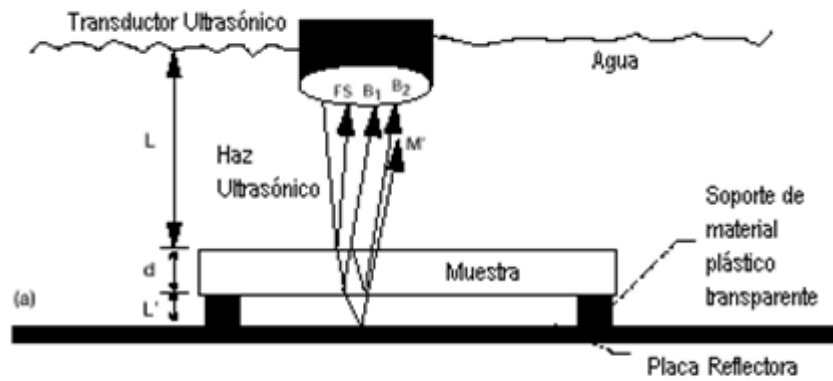


Figura 3.2 Técnica Pulso-eco

En la figura 3.3 se muestra la representación grafica de esta técnica.

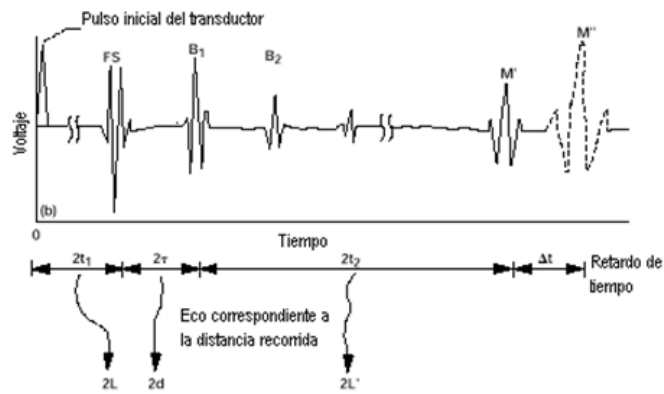


Figura 3.3 Representación Grafica de pulso eco

El tiempo que demora el pulso en su viaje de ida y vuelta al transductor emisor depende de la velocidad de propagación del medio.

### **3.3 Velocidad de propagación**

La velocidad de la propagación de la onda depende del material por el cual se esté propagando la onda ultrasónica y de sus propiedades físicas. Generalmente, el sonido se mueve a mayor velocidad en líquidos y sólidos que en gases.

Así, la velocidad del sonido en el aire seco a 0°C es de 331 m/s y por cada elevación de un grado de temperatura, la velocidad del sonido en el aire aumenta en 0.62 m/s., y en el agua de mar a 8°C la velocidad del sonido es de 1435 m/s.

El sonido puede propagarse como ondas longitudinales, ondas transversales y ondas superficiales. Las ondas longitudinales y transversales son los dos modos de propagación más ampliamente utilizados en las pruebas de ultrasonidos. El movimiento de la propagación de las ondas longitudinales y transversales se ilustra en la figura 3.4.

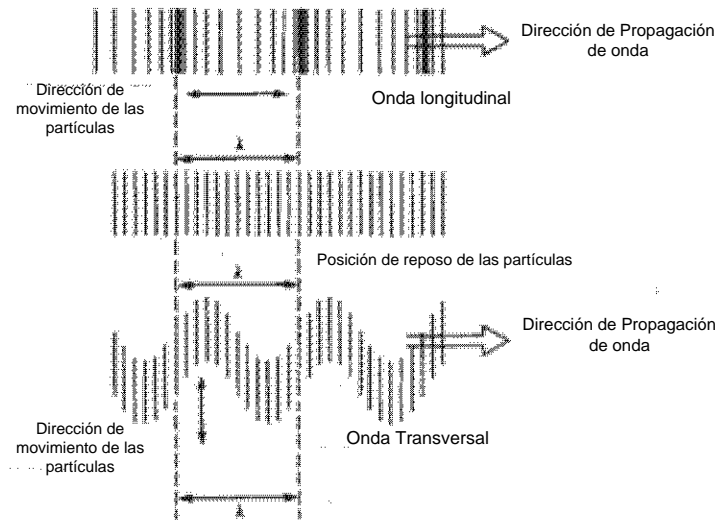


Figura 3.4 Movimiento de ondas longitudinales y transversales

En la onda longitudinal, las oscilaciones se producen en la dirección longitudinal o la dirección de propagación de la onda. Este tipo de ondas pueden ser generados en líquidos, así como sólidos debido a que la energía viaja a través de la estructura atómica por una serie de compresiones y de expansiones.

En la onda transversal, las partículas oscilan en un ángulo recto o transversal a la dirección de propagación. Las ondas transversales requieren un material acústicamente sólido para la propagación efectiva, y por lo tanto, no se propagan de manera efectiva en materiales tales como líquidos o gases este tipo de ondas son relativamente débiles en comparación con las ondas longitudinales. De hecho, estas ondas se generan habitualmente en materiales utilizando parte de la energía de las ondas longitudinales.

La figura 3.5 muestra la representación gráfica en que las ondas longitudinal y transversal se comportan.

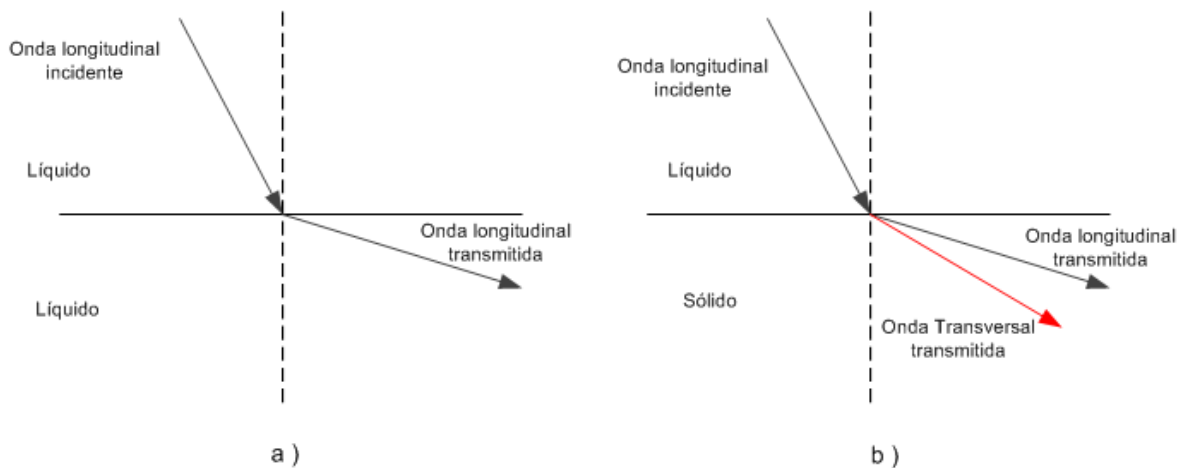


Figura 3.5 Comportamiento de ondas longitudinal y transversal entre 2 medios a) 2 líquidos b) un líquido y un sólido

La velocidad de propagación es considerada una constante en phantoms comerciales de ultrasonido, alrededor de los 1540 m/s en un rango muy estrecho de temperaturas. En el cuerpo humano la velocidad de propagación de onda varía de acuerdo al tipo de tejido, en el caso de los tejidos más blandos se encuentra en el intervalo que va desde los 1540m/s y hasta 1650 m/s, en tejidos grasos la velocidad es más baja, de alrededor de 1450 m/s y en el hueso la velocidad de propagación es sustancialmente mayor variando en un rango desde 2500 m/s hasta 4000 m/s [13].

En la tabla 3.1 se muestran las velocidades de propagación longitudinal y transversal para algunos solidos (Ver anexo B).

Material	VL mm/s	VS mm/s
Acero	5.9	3.2
Aluminio	6.42	3.04
Arsénico	2.58	1.4
Berilio	12.89	8.88
Bismuto	2.2	1.1
Cadmio	2.8	1.5
Carburo de Boro	11	-
Cobre	5.01	2.27
Concreto	3.1	-
Cuarzo	2.3	-
Granito	6.5	2.7
Hielo	3.99	1.98
Hierro	5.9	3.2
Ladrillo	4.3	-
Madera - Pino	3.5	-
Magnesio	5.8	3
Mármol	3.8	-
Níquel	5.6	3
Oxido de Silicio	5.7	3.75
Óxido de Zinc	6.4	2.95
Plata	3.6	1.6
Platino	3.26	1.73
Plomo	2.2	0.7
Porcelana	5.9	-
PVDF	2.3	-
PZT	4.72	-
Silicón	8.43	5.84
Teflón	1.39	-
Vidrio	5.1	2.8

VL: Velocidad de propagación longitudinal Vs: Velocidad de propagación Transversal

Tabla 3.1 Velocidad de propagación longitudinal y transversal en solidos

Para el caso de los líquidos estos cuentan solo con la velocidad longitudinal, en la tabla 3.2 se muestran las velocidades de propagación longitudinal para algunos líquidos.

Material	VL mm/s
Acetona	1.27
Alcohol	1.24
Anilina	1.69
Éter etílico	0.985
Gasolina	1.25
Glicerina	1.904
Miel de abeja	2.03
Mercurio	1.45
Morfina	1.44
Aceite de bebé	1.43
Agua	1.48
Agua salada	1.53

Tabla 3.2 Velocidad de propagación longitudinal en líquidos

Cuando se requiere conocer la velocidad de propagación de distintos puntos dentro de una muestra, la medición puede realizarse empleando ultrasonido a través de un barrido mecánico que cubra el volumen total de interés, empleando para ello de un transductor emisor – receptor y un tanque de agua, donde los ecos obtenidos de almacenan para su posterior procesamiento.

Las matrices de datos correspondientes a los vectores de ecos nos brindan potencialmente información acerca de las distintas velocidades de propagación en la muestra.



Las diferencias en las velocidades de propagación de la onda pueden deberse a distintos factores, tales como: cambios de impedancia acústica (distintos materiales constituyendo una muestra), fenómenos de calentamiento, efectos asociados a la deposición de energía acústica empelada en procedimientos de terapia ultrasónica, etc. [3].

### **3.4 Atenuación**

La energía de una señal decae con la distancia. La atenuación es la reducción de nivel de una señal, cuando pasa a través de un elemento, o la reducción en nivel de la energía de vibración, cuando pasa a través de una estructura. La atenuación se mide en Decibeles, pero también se puede medir en porcentajes. Por lo general, esta pérdida puede ser causada por absorción, scattering u otra característica de los materiales. Básicamente la atenuación del sonido incrementa con un aumento en la frecuencia.

Si introducimos una señal eléctrica con una potencia  $P_2$  en un circuito pasivo, esta sufrirá una atenuación y al final de dicho circuito obtendremos una potencia  $P_1$ . La atenuación ( $\gamma$ ) será igual a la diferencia entre ambas potencias.

No obstante, la atenuación no suele expresarse como diferencia de potencias sino en unidades logarítmicas como el Decibel, ya que tiene un manejo más cómodo a la hora de efectuar cálculos.

En la figura 3.6 podemos observar un ejemplo gráfico de lo explicado anteriormente

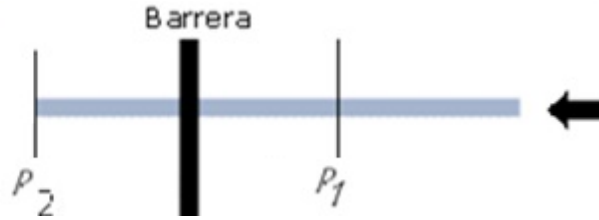


Figura 3.6 Ejemplo de Potencias para atenuación

La atenuación, en el caso del ejemplo anterior vendría, de este modo, expresada en decibeles por la siguiente fórmula:

$$\gamma (dB) = 10 \log(P_1) - 10 \log(P_2)$$

$$\gamma (dB) = 10 \log\left(\frac{P_1}{P_2}\right)$$

Dónde:

$$\gamma = \textit{Atenuacion}$$

$$P_2 = \textit{Presion Inicial}$$

$$P_1 = \textit{Presion Final}$$

La atenuación aumenta cuando sube la frecuencia o se aumenta la distancia. Así mismo, cuando la señal choca con un obstáculo, el valor de atenuación depende considerablemente del tipo de material del obstáculo. Los obstáculos metálicos tienden a reflejar una señal, en tanto que el agua la absorbe. El debilitamiento de la señal se debe en gran parte a las propiedades del medio que atraviesa la onda.

### 3. 5 Absorción

La capacidad de absorción del sonido de un material es la relación entre la energía absorbida por el material y la energía reflejada por el mismo. Es un valor que varía entre 0 (toda la energía se refleja) y 1 (toda la energía es absorbida) [14].

El coeficiente de absorción de un material se define como la relación entre la energía que absorbe y la energía de las ondas sonoras que inciden sobre él por unidad de superficie.

$$\alpha = \frac{E_a}{E_i}$$

Dónde:

$\alpha$  = Coeficiente de absorcion

$E_a$  = Energia absorbida

$E_i$  = Energia incidente

Un valor igual a 1 indica que toda la energía sonora incidente es absorbida, mientras que  $\alpha = 0$  representa que toda la energía es reflejada.

Con la propagación de la onda en un material, se produce una vibración de partículas que excitarán a las siguientes y así sucesivamente; la transmisión de las oscilaciones en el medio producirá aumentos de temperatura si la señal acústica es de alta potencia, el efecto de la temperatura combinada con la estructura de los materiales, atenuará la señal.

Cuando una onda de sonido con gran energía golpea una de las superficies, parte de la energía del sonido se refleja y otra parte penetra en la superficie, parte de la energía de la onda del sonido es absorbida convirtiéndose en energía calorífica en el material, y el resto se transmite alrededor. El nivel de energía convertido en energía calorífica depende de las propiedades absorbentes de sonido del material y de la potencia de la señal.

Se puede explicar la absorción de forma elemental como un efecto frenado de la oscilación de las partículas, lo cual explica también porque una oscilación rápida pierde más energía que en una oscilación lenta. La absorción aumenta generalmente con la frecuencia pero en menor grado que la dispersión.

La absorción debilita la energía transmitida o la amplitud del eco por golpear la discontinuidad del material como de la pared de fondo.

Una vez absorbida, la energía se pierde para siempre, lo que provoca una atenuación de las intensidades de voltaje y campo magnético al igual que una reducción correspondiente en la densidad de potencia.

La absorción de una onda depende del medio en que se propague. Las pérdidas por absorción no dependen de la distancia a la fuente de radicación, sino más bien a la distancia total que la onda se propaga a través del medio, es decir, cuando la onda se propaga a través de un medio homogéneo cuyas propiedades son uniformes, las pérdidas por absorción en el primer segmento de propagación son las mismas que en el último.

### **3.6 Dispersión**

La dispersión se produce por la presencia de pequeñas heterogeneidades que actúan como centros dispersores por esta razón es posible que estas y las discontinuidades reales se puedan confundir.

Las pequeñas heterogeneidades pueden ser clasificadas de la siguiente manera:

- Inclusiones, tales como las inclusiones no metálicas de los aceros, o poros.
- Heterogeneidades genuinas tal como la porosidad en materiales sinterizados.
- Constituyentes precipitados de naturaleza distinta, tal como grafito en las fundiciones grises

- Anisotropía: Esta se da si los granos del material están orientados al azar y poseen distintas propiedades elásticas en diferentes direcciones estas constituirán una heterogeneidad para el haz ultrasónico.

En el método pulso-eco la absorción no solo reduce la amplitud del eco de la discontinuidad sino que además produce numerosos ecos parásitos con diferentes recorridos llamados “ruido de la señal”, en los que los ecos verdaderos pueden quedar enmascarados. Estas indicaciones falsas no se pueden contrarrestar aumentando la amplificación ya que el efecto se incrementa simultáneamente.

### **3.7 Labview**

LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) es un lenguaje de programación gráfico para el diseño de sistemas de adquisición de datos, instrumentación y control, permite diseñar interfaces de usuario mediante una consola interactiva basado en software [15].

Algunas de las ventajas que proporciona el empleo de LabVIEW son las siguientes:

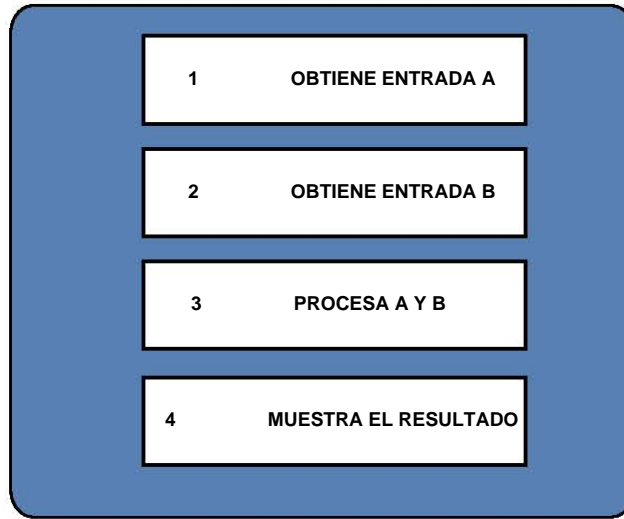
- Se reduce el tiempo de desarrollo de las aplicaciones ya que es muy intuitivo y fácil de aprender.
- Dota de gran flexibilidad al sistema, permitiendo cambios y actualizaciones tanto del hardware como del software.
- Da la posibilidad a los usuarios de crear soluciones completas y complejas.

- Con un único sistema de desarrollo se integran las funciones de adquisición, análisis y presentación de datos.
- Tiene la posibilidad de incorporar aplicaciones escritas en otros lenguajes.

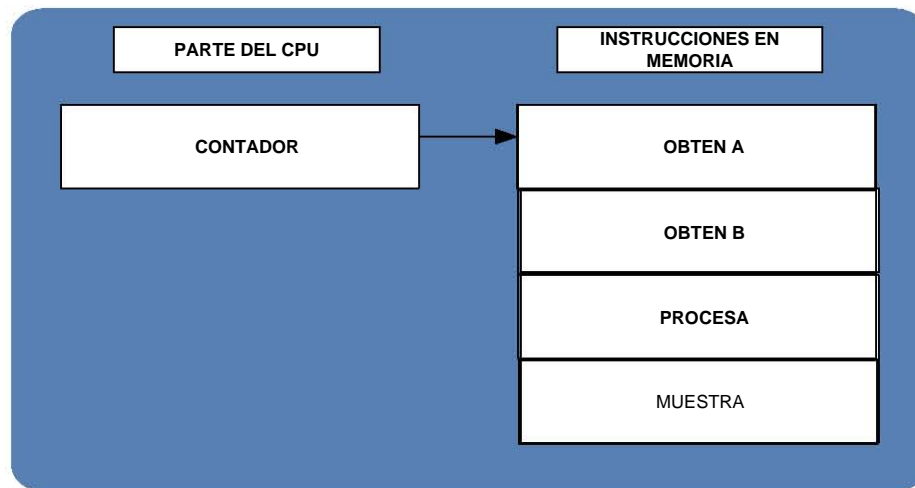
### **3.7.1 Secuencia y flujo de datos**

Los lenguajes de programación convencionales están basados en un concepto llamado control de flujo (control flow), el cual está orientado a hacer que las cosas sucedan un paso a la vez con un orden explícito. Labview por otra parte es formalmente conocido como un lenguaje de flujo de información, lo único que le importa es que cada nodo (objeto que toma entradas y las procesa en salidas) tenga todas sus entradas disponibles antes de ejecutarse [16].

El procedimiento de los lenguajes de programación convencionales para el control de flujo es el que se muestra en la figura 3.7.



a)



b)

Figura 3.7 Programación de control de flujo en un lenguaje convencional a) Como el lenguaje de programación dice que hacer a la CPU b) Como la CPU piensa cuando es programado el control de flujo.



En la figura 3.8 se muestra el diagrama de flujo de información (data flow) el cual es casi idéntico a un diagrama de Labview

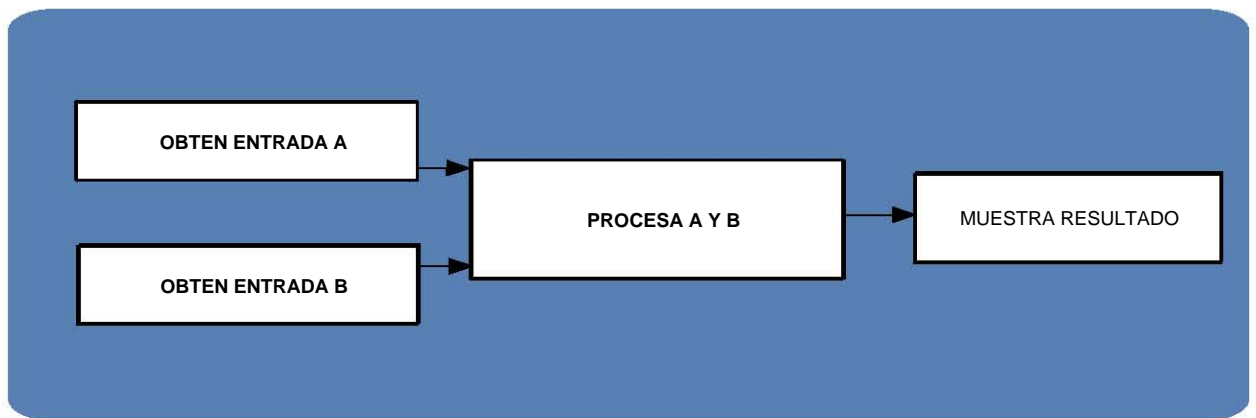


Figura 3.8 Flujo de datos en Labview

En el lenguaje convencional la parte de procesar las entradas A y B solo pueden ejecutar después que la adquisición de A y de B está completo, en este caso se fuerza a que se adquiera A antes de adquirir B pero podría existir un caso en el que B está listo para ser enviado antes que A, si se da este caso se desperdiciaría tiempo esperando a que A este listo.

La versión de dataflow no fuerza a que se haga una adquisición antes que otra, LABVIEW nos permite tener cualquier número de nodos diferentes ejecutándose en paralelo.

### **3.7.2 Funcionamiento de Labview**

Los programas desarrollados en LabVIEW se denominan Instrumentos Virtuales (VIs), porque su apariencia y funcionamiento imitan los de un instrumento real. Sin embargo son análogos a las funciones creadas con los lenguajes de programación convencionales. Los VIs tienen una parte interactiva con el usuario y otra parte de código fuente, y aceptan parámetros procedentes de otros VIs.

Todos los VIs tienen un panel frontal y un diagrama de bloques.

### **3.7.3 Panel Frontal**

Se trata de la interfaz gráfica del VI con el usuario. Esta interfaz recoge las entradas procedentes del usuario y representa las salidas proporcionadas por el programa. Un panel frontal está formado por una serie de botones, pulsadores, potenciómetros, gráficos, etc.

En la figura 3.9 se muestra el panel frontal en un VI

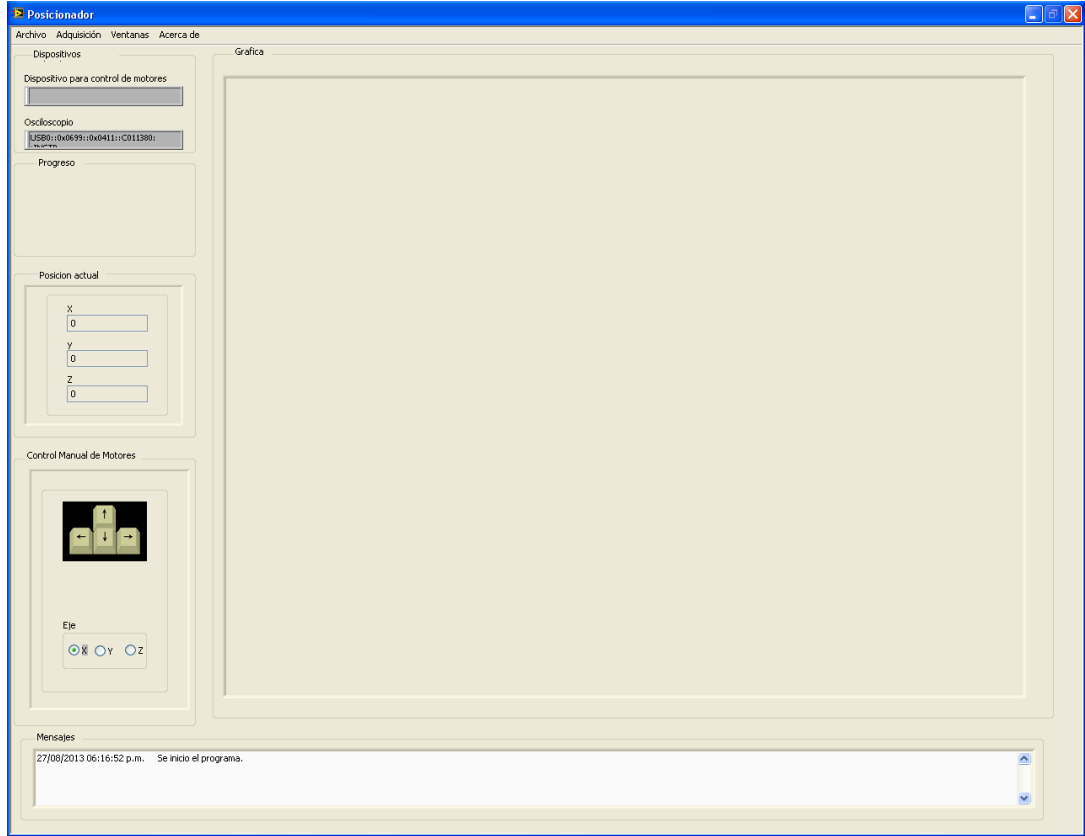


Figura 3.9 Panel frontal

### 3.7.4 Programación grafica

El diagrama de bloques constituye el código fuente del VI. En el diagrama de bloques es donde se realiza la implementación del programa del VI para controlar o realizar cualquier procesamiento de las entradas y salidas que se crearon en el panel frontal.

El diagrama de bloques incluye funciones y estructuras integradas en las librerías que incorpora LabVIEW y cada control que se utiliza en la interfaz tiene una representación en el panel de código, igualmente los indicadores necesarios para entregar la información procesada al usuario tienen un icono que los identifica en el diagrama de bloques. Los controles pueden ser booleanos, numéricos, strings, un arreglo matricial de

estos o una combinación de los anteriores; y los indicadores pueden ser como para el caso de controles pero pudiéndolos visualizar como tablas, gráficos, etc.

Estos controles e indicadores que se colocaron previamente en el Panel Frontal, se materializan en el diagrama de bloques mediante los terminales como se muestra en la figura 3.10.

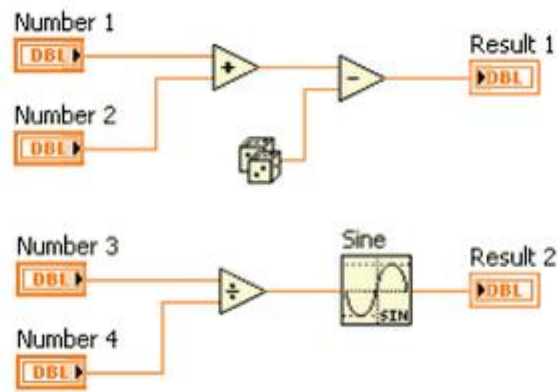
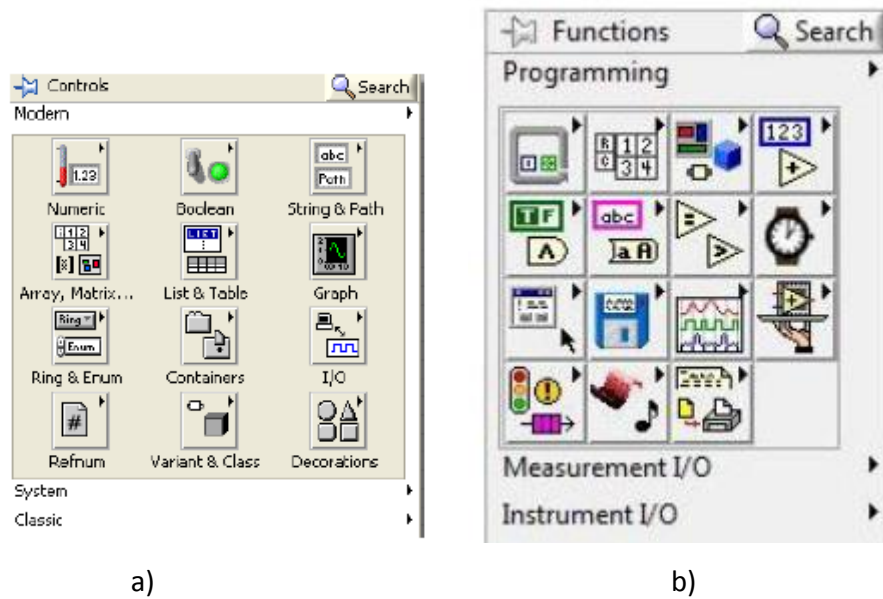


Figura 3.10 Ejemplo de programación gráfica

En el panel frontal existe la paleta de controles (Controls Palette) que contiene indicadores pudiéndolos visualizar como tablas, gráficos, botones, etc. En el “diagrama de bloques” tenemos la paleta de funciones, donde se encuentran todas las funciones utilizadas dentro de la programación como se muestra en la figura 3.11. Hay que tener en cuenta que cuando se realiza una conexión en un programa, para que exista concordancia con el flujo de datos, estos deben coincidir con el mismo tipo de datos [12].



a)

b)

Figura 3.11 a) Paleta de control b) Paleta de funciones

### 3.7.5 Estructuras de Labview

LabVIEW posee una gran variedad de librerías de funciones y subrutinas. Además de las funciones básicas de todo lenguaje de programación como se muestra en la tabla 3.3, LabVIEW incluye librerías específicas para la adquisición de datos, control de instrumentación VXI, GPIB y comunicación serie, análisis presentación y guardado de datos.

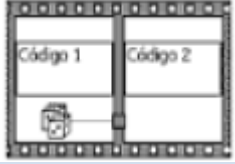

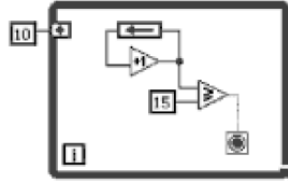
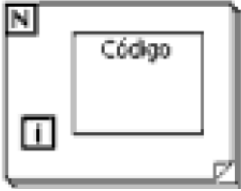
ESTRUCTRA	FUNCION
	<p>La estructura secuencial ejecuta el código en el orden que se encuentre dentro, es decir, primero ejecuta lo que se encuentre en la estructura primaria, luego lo que se encuentre en la siguiente.</p>
	<p>La estructura "case" se emplea cuando dos o más acciones alternativas dependen de una condición.</p>
	<p>La estructura "while" ejecuta una acción, hasta que se le indique lo contrario.</p>
	<p>La estructura "for" repite el código que se encuentre en su interior un determinado número de veces.</p>

Tabla 3.3 Principales estructuras de Labview

Las estructuras en conjunto con controles, indicadores y arreglos de estos serán utilizadas para el desarrollo del software para el sistema de adquisición de datos.

## CAPITULO 4

### Pruebas experimentales en el laboratorio

#### 4.1 Introducción

Se realizó un programa para el control del sistema tridimensional de medición de intensidad acústica en la plataforma Labview 2011 de la compañía National Instruments que permite la obtención de matrices de ecos para posteriormente procesarlos y mostrar los resultados gráficamente. Este programa sirve como interfaz con el usuario, este último es quién determina la cantidad de ejes en los que se realizará el barrido mecánico para la adquisición de datos. Las opciones de barrido se muestran en la figura 4.1 en esta ventana el usuario puede elegir un solo eje (A-scan), 2 ejes para formar un plano (B-scan) o 3 ejes para generar una volumen.

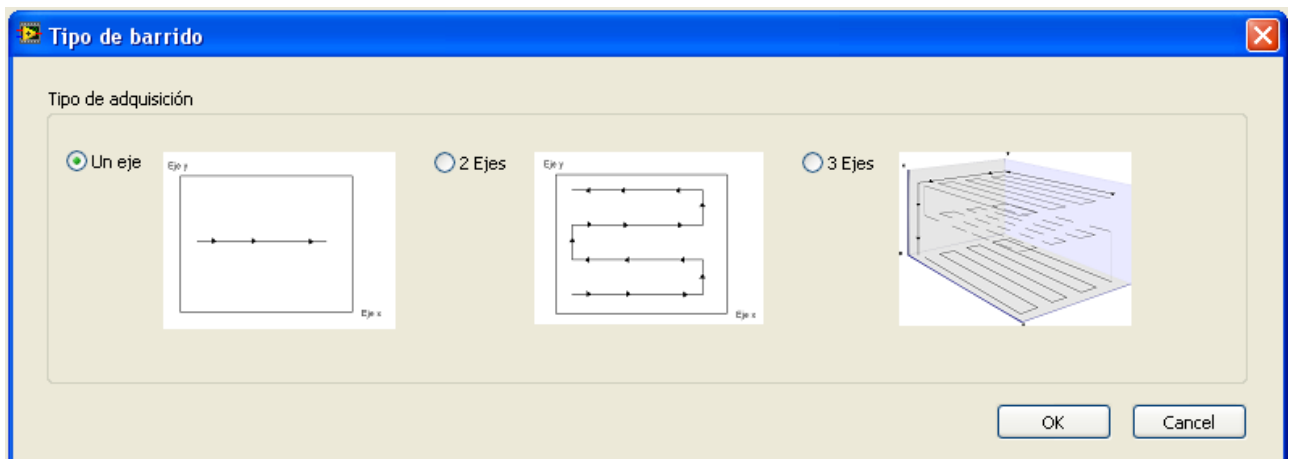


Figura 4.1 Menú de Tipo de Barrido

Después de que el usuario hace la selección de la trayectoria que se realizará, se configura la distancia entre muestras, es decir la separación que existirá entre cada una de las adquisiciones. La distancia que se desea recorrer en cada uno de los ejes se puede definir indicando el número de pasos que debe dar cada uno de los motores a pasos o bien, es posible indicar la distancia en milímetros (mm) para cada uno de los ejes de exploración, como se muestra en los menús de exploración en las figuras 4.2, 4.3 y 4.4 dependiendo el tipo de barrido seleccionado.

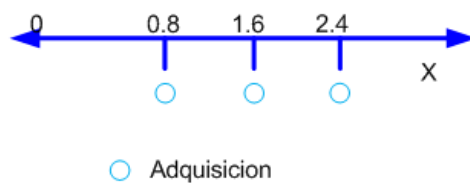
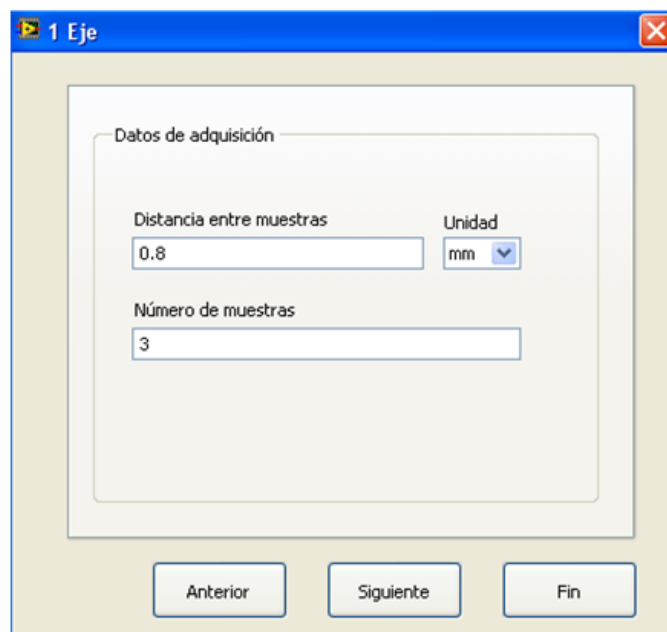


FIGURA 4.2 Menú de opciones para 1 eje



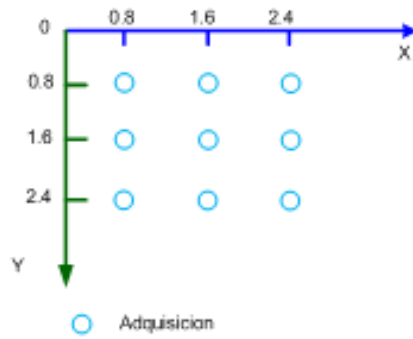
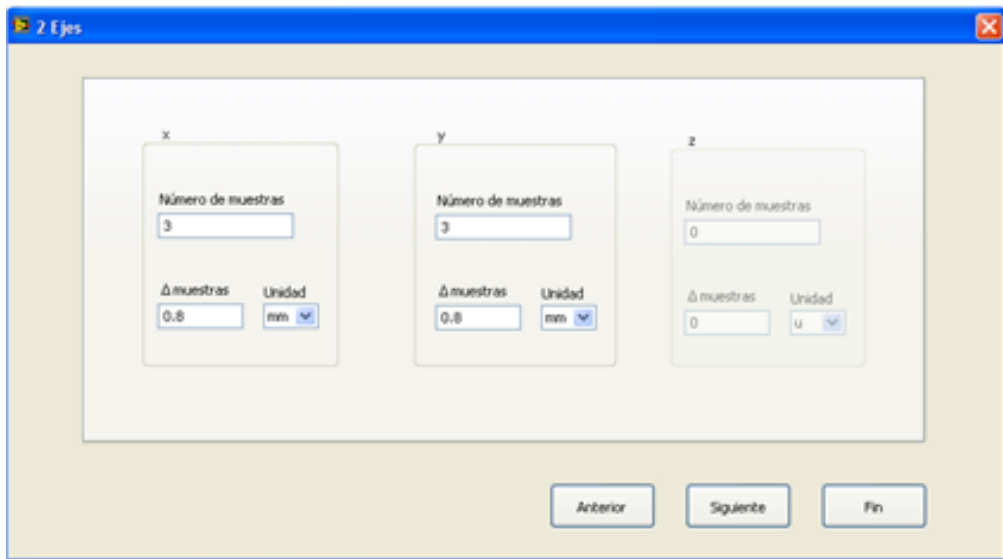


FIGURA 4.3 Menú de opciones para 2 ejes

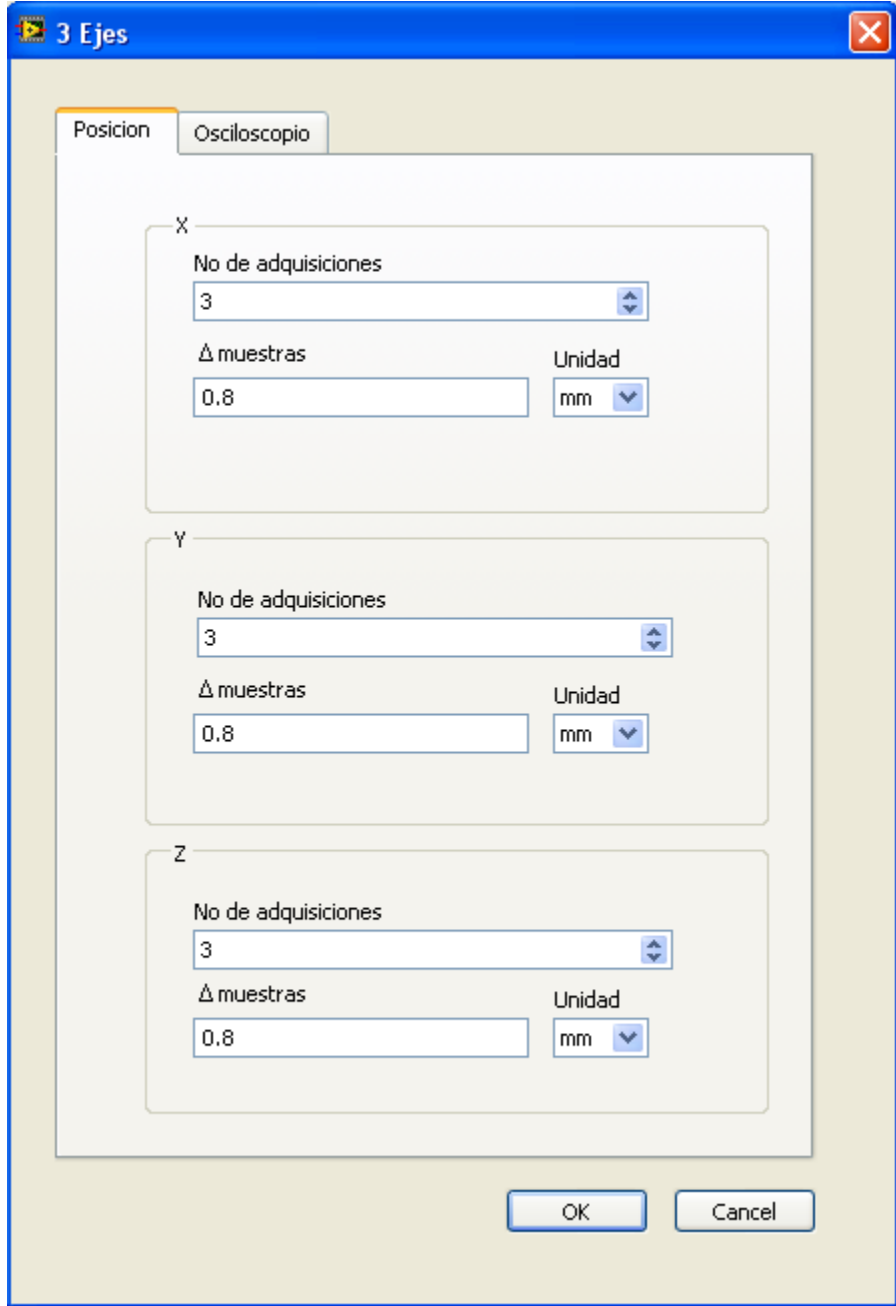


FIGURA 4.4 Menú de opciones para 3 ejes

Una vez que se ha configurado el tipo de exploración/ barrido, el usuario debe definir por cual canal del osciloscopio se adquirirá el tren de ecos y se le indicará además la longitud del vector de datos, el cual puede tener un tamaño de 1000 puntos como mínimo y un máximo de 5 millones de puntos. . Posteriormente se indica que comience la adquisición de datos. La figura 4.5 muestra el menú de opciones de configuración del osciloscopio.

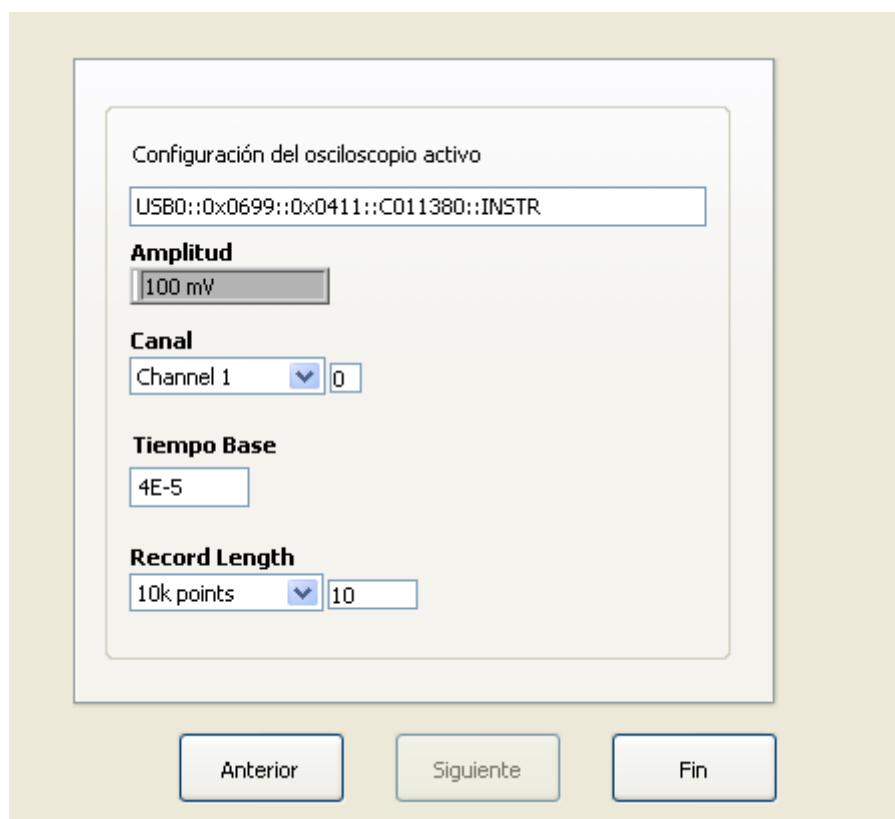


Figura 4.5 Menú de opciones para configuración del osciloscopio

Se realizaron los pasos anteriormente descritos al realizar pruebas acústicas en 1 eje, 2 ejes y 3 ejes que se reportan a continuación.

## 4.2 Pruebas acústicas

Las metas del sistema tridimensional de medición son: caracterizar transductores ultrasónicos, así como evaluar el desempeño de transductores comerciales y realizar pruebas no destructivas en general. Las pruebas consisten en hacer barridos en diferentes direcciones adquiriendo la señal acústica proveniente del transductor y/o del hidrófono según sea el caso para con estos datos realizar graficas que permitan analizar visualmente los datos obtenidos.

Las pruebas que se realizaron, se describen a continuación

- Un eje: El barrido se hace en un solo sentido, este puede ser en el eje X, eje Y o en el eje Z tomando la primera muestra en el origen y las consecutivas hasta llegar al número de muestras determinado por el usuario y teniendo una distancia entre muestras de 800 micras.
- 2 ejes: Los barridos se hacen en 2 direcciones, primero se adquieren los datos en el origen y se tienen 3 tipos de adquisiciones para formar un plano:
  - 1.- Plano XY: Después de la primera adquisición en el origen, se toman las siguientes primeramente en el sentido **positivo** del eje X hasta llegar al valor de numero de muestras configurado por el usuario, después se desplaza el eje Y en su primera unidad para continuar con las muestras en el sentido **negativo** del eje X de igual manera alcanzando el número de muestras establecido, y se repite esta operación hasta llegar al número total de muestras establecidas para el eje Y, es decir, se toma el eje Y como pivote para las tomas.

2.- Plano XZ: Se realiza el barrido similar al descrito anteriormente pero en este caso se utiliza el eje Z como pivote para la adquisición de datos.

- Tres ejes: Los barridos se hacen en 3 sentidos, comenzando con la dinámica para adquirir el plano formado por los ejes "X" y "Y" (plano XY) y tomando como pivote el eje Z siendo este último el que ira aumentado una unidad cada vez que se termine de adquirir el plano XY hasta alcanzar el número de muestras establecido por el usuario en el software.

En la figura 4.6 Se muestra los avances en milímetros para la adquisición de datos y poder validar la prueba acústica y en la figura 4.7 los ejes de referencia en el objeto bajo prueba.

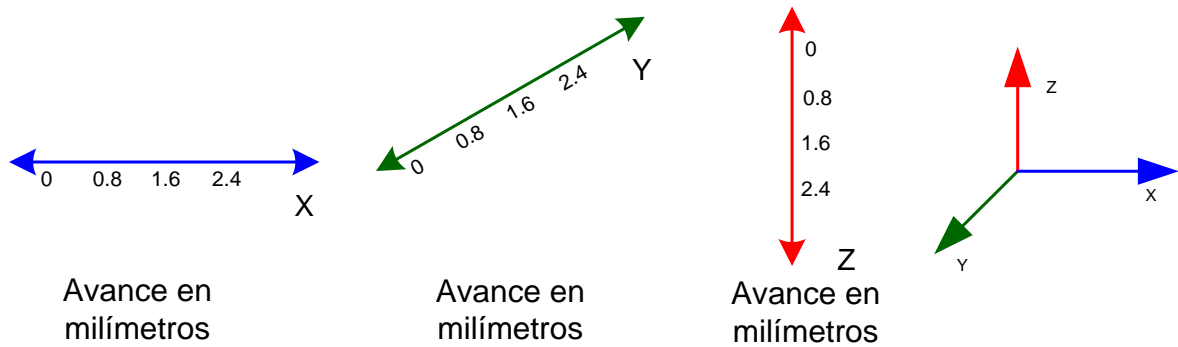


FIGURA 4.6. Ejes de exploración

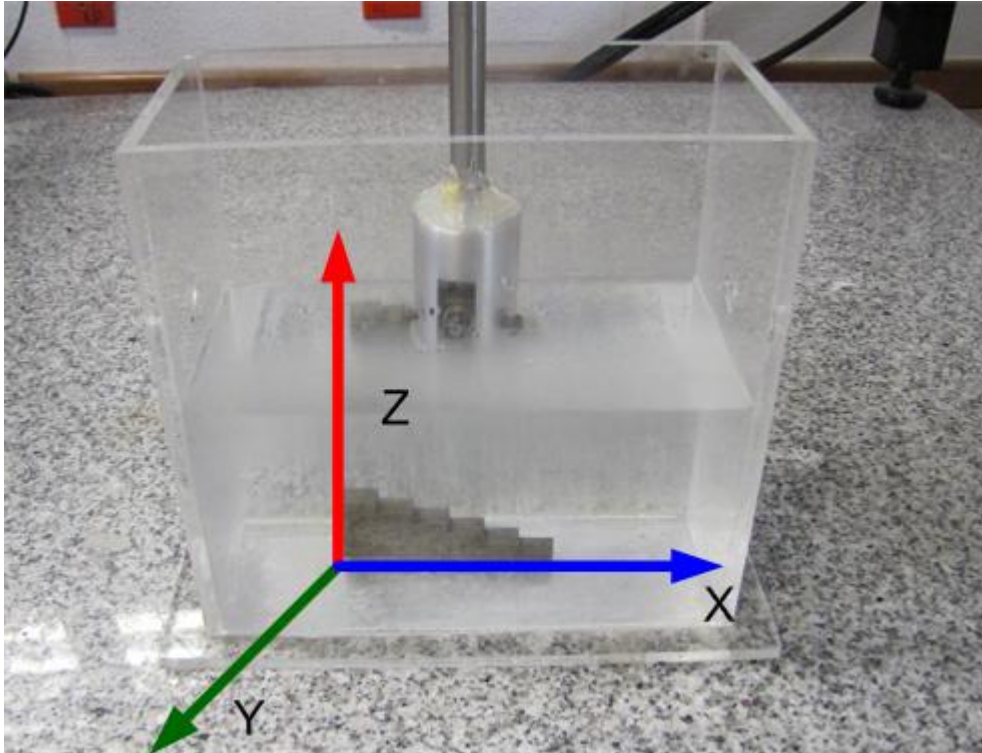


Figura 4.7 Ejes de referencia en el objeto bajo prueba.

En la figura 4.8 podemos visualizar el sistema completo para la adquisición de los datos.

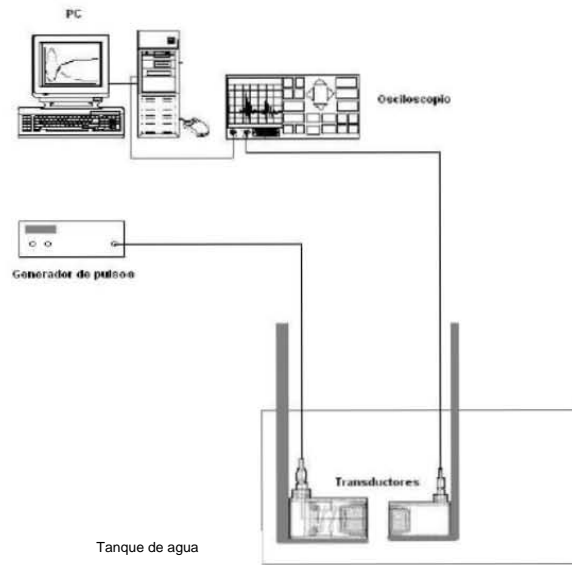


Figura 4.8 Sistema para caracterización acústica

La adquisición de los datos se realiza a través de la tarjeta MATEC, con dicha tarjeta se envían pulsos que excitan al transductor que está sumergido en el agua que contiene un tanque cuando el sistema mecánico se detiene, se captura la señal empleando un osciloscopio y este último se comunica con la PC a través del puerto USB. Posteriormente se realiza un procesamiento a dichas señal y se grafican. En la figura 4.9 podemos observar los elementos del sistema de adquisición.



a)



b)

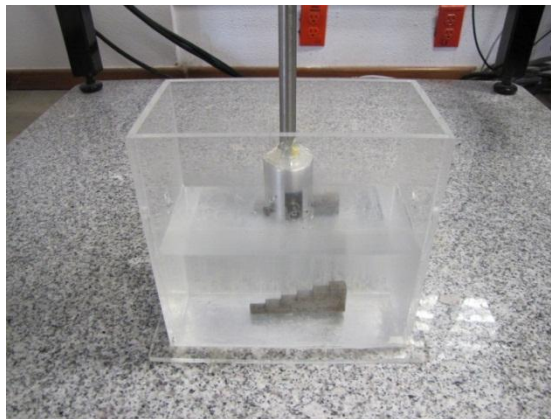
Figura 4.9 Sistema de posicionamiento tridimensional (a) osciloscopio, (b) estructura



Se realizaron pruebas con un objeto bajo prueba de acero de 9cm de largo, 1.5cm de ancho y 3cm de alto, cada escalón tiene 1.5cm por lado y otro de acrílico de 5.5cm de largo, 2cm de ancho y 3.5cm de alto, cada escalón tiene unas dimensiones de 2cm de largo y 1.5cm de ancho, en la figura 4.10 (a) se muestra la escalera de acero y en la figura 4.10 (b) se muestra esta dentro del tanque de exploración.



a)



b)

FIGURA 4.10 Objeto bajo prueba de acero

El segundo objeto esta hecho de acrílico como se muestra en la figura 4.11

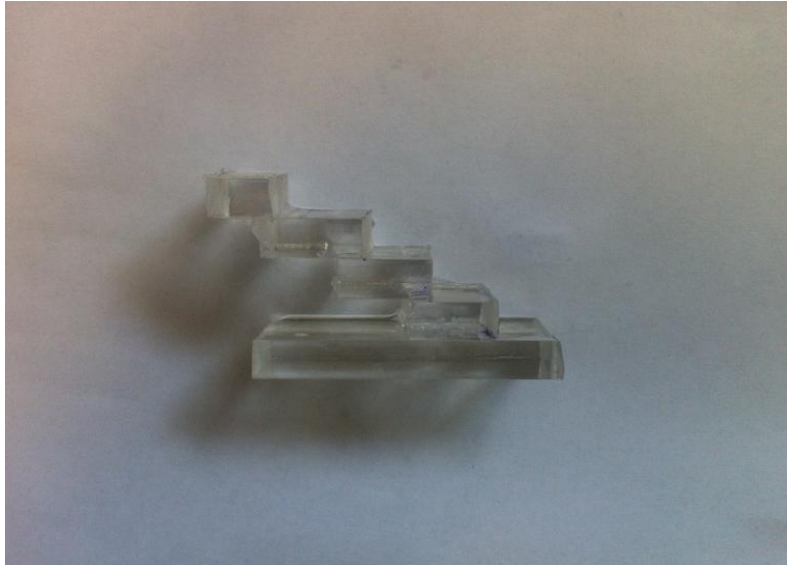


FIGURA 4.11 Objeto bajo prueba de acrílico

Utilizando la plataforma Matlab se construyeron las imágenes correspondientes a las adquisiciones de los experimentos realizados.

La figura 4.12, muestra el resultado para la adquisición relacionada al eje x (A Scan) con 135 muestras y 800 micras de distancia del objeto de acero.

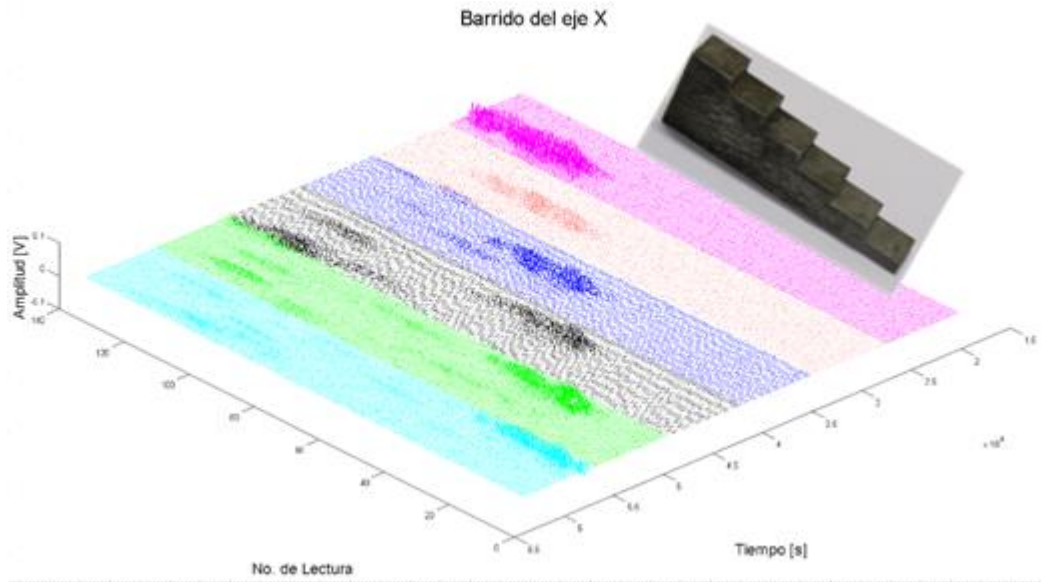


Figura 4.12 Formas de onda obtenidas para adquisición en el eje X con objeto bajo de prueba de acero

La figura 4.13, muestra el resultado para la adquisición relacionado al eje X (A Scan) con 95 muestras y 800 micras de distancia del objeto de acrílico.

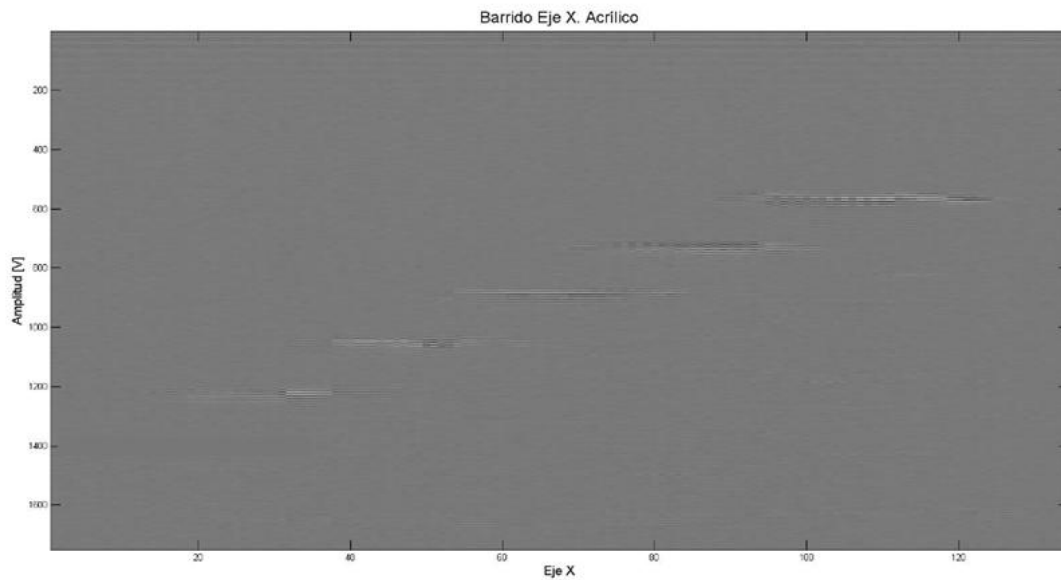


Figura 4.13 Formas de onda obtenidas para adquisición en el eje X con objeto bajo de prueba de acrílico

A continuación se muestran los resultados para las adquisiciones hechas para formar un plano con los ejes, XY, XZ con ambos materiales.

Para el plano XY con la escalera de acero se tomaron 135 muestras para el eje X con una distancia entre cada una de 800 micras y para el eje Y fueron 12 muestras separadas por una delta de 3mm.

La figura 4.14 muestra el resultado con lecturas para cada Y y la figura 4.15 muestra resultado de este plano.

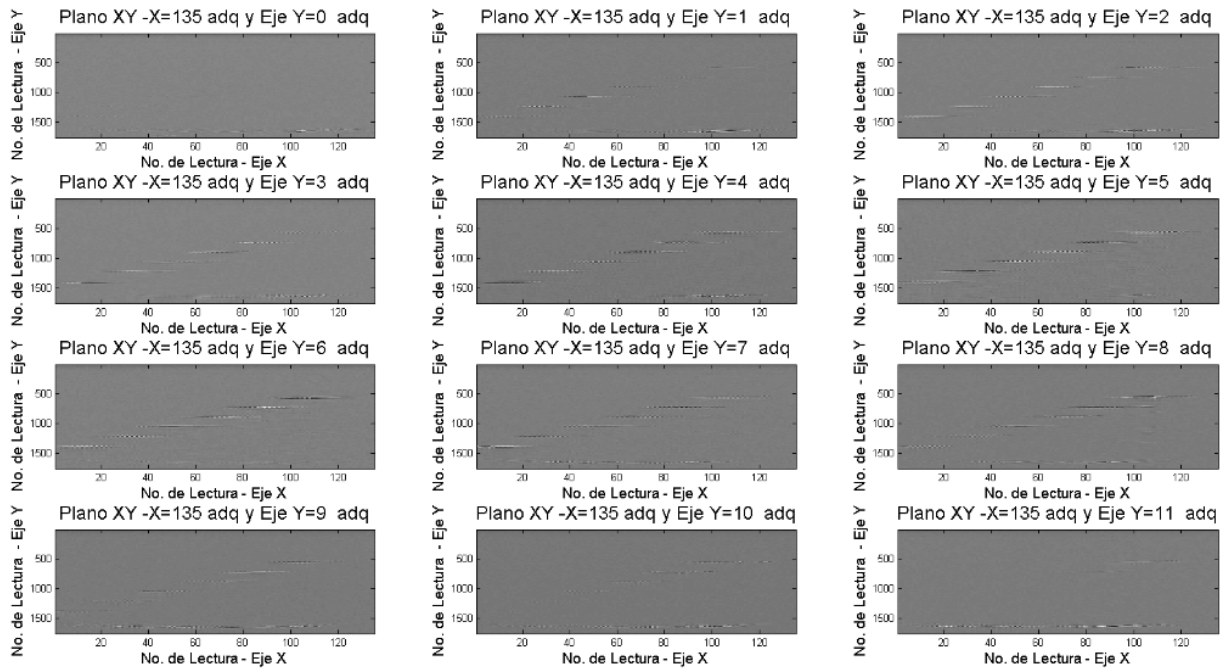


Figura 4.14 Formas de onda obtenidas para cada adquisición en Y del plano XY con la escalera de acero

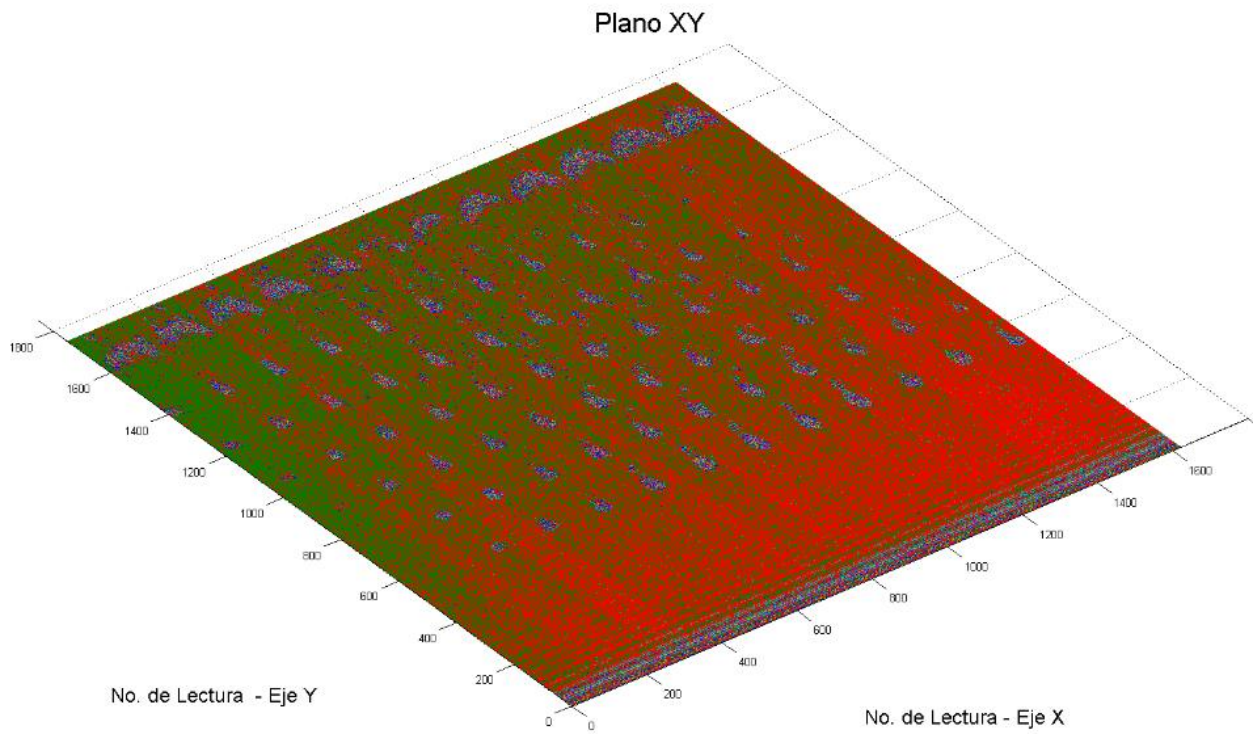


Figura 4.15 Formas de onda obtenidas para adquisición en el plano XY con escalera de acero

Para el plano XY con la escalera de acrílico se tomaron 95 muestras para el eje X con una distancia entre cada una de 800 micras y para el eje Y fueron 10 muestras separadas por una delta de 4mm.

La figura 4.16 muestra el resultado grafico para las adquisiciones en XY.

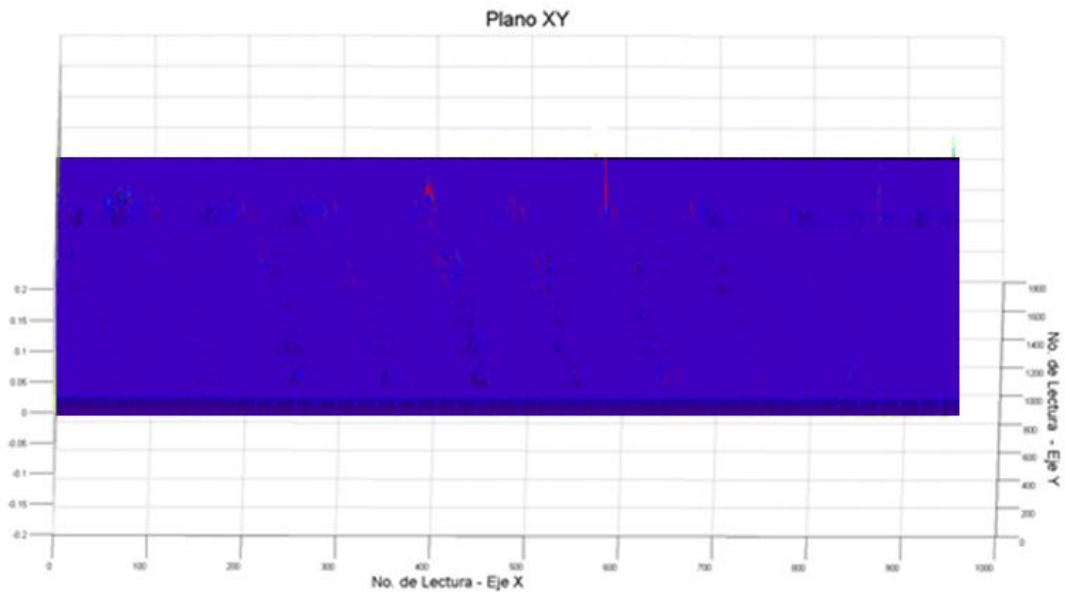


Figura 4.16 Formas de onda obtenidas para adquisición en el plano XY con escalera de acrílico

Para el plano XZ de igual manera se adquirieron 97 muestras en el eje x con distancia entre cada una de 800 micras y en el eje z se obtuvieron 3 muestras con una delta entre cada una de 40 micras para la escalera de acero.

La figura 4.17 muestra el resultado con lecturas para cada Z y la figura 4.18 muestra resultado de este plano.

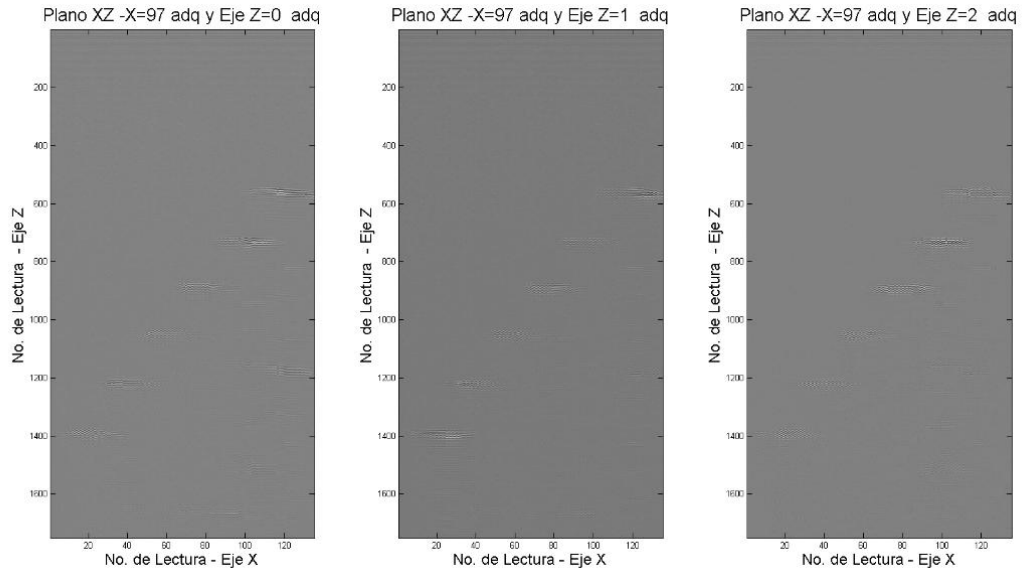


Figura 4.17 Formas de onda obtenidas para cada adquisición en Z del plano XZ con la escalera de acero



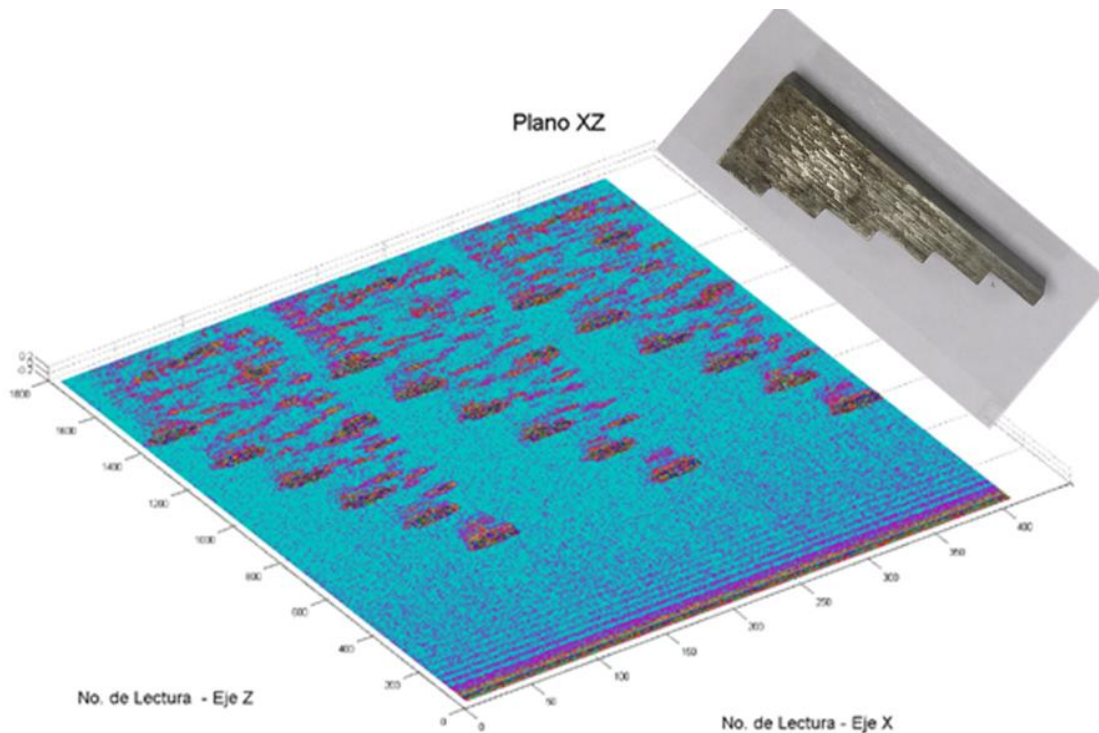


Figura 4.18 Formas de onda obtenidas para adquisición en el plano XZ con escalera de acero

Para el plano XZ de la escalera de acrílico se adquirieron 95 muestras en el eje x con distancia entre cada una de 800 micras y en el eje z se obtuvieron 4 muestras con una delta entre cada una de 60 micras para la escalera de acero.

La figura 4.19 muestra el resultado con lecturas para cada z y la figura 4.20 muestra resultado de este plano.

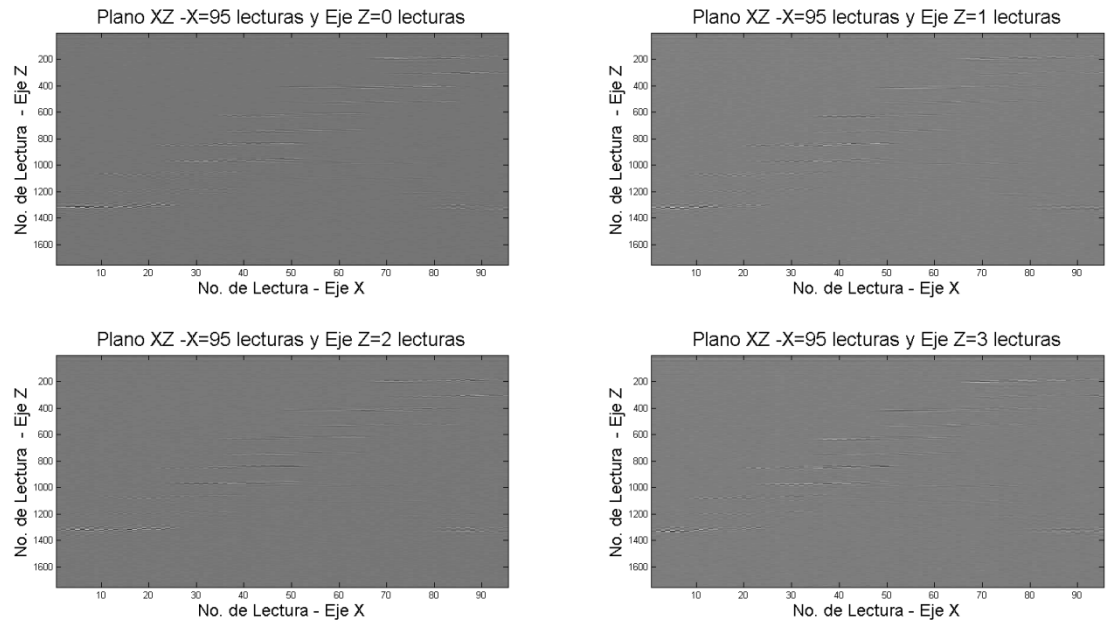


Figura 4.19 Formas de onda obtenidas para cada lectura en Z con la escalera de acrílico

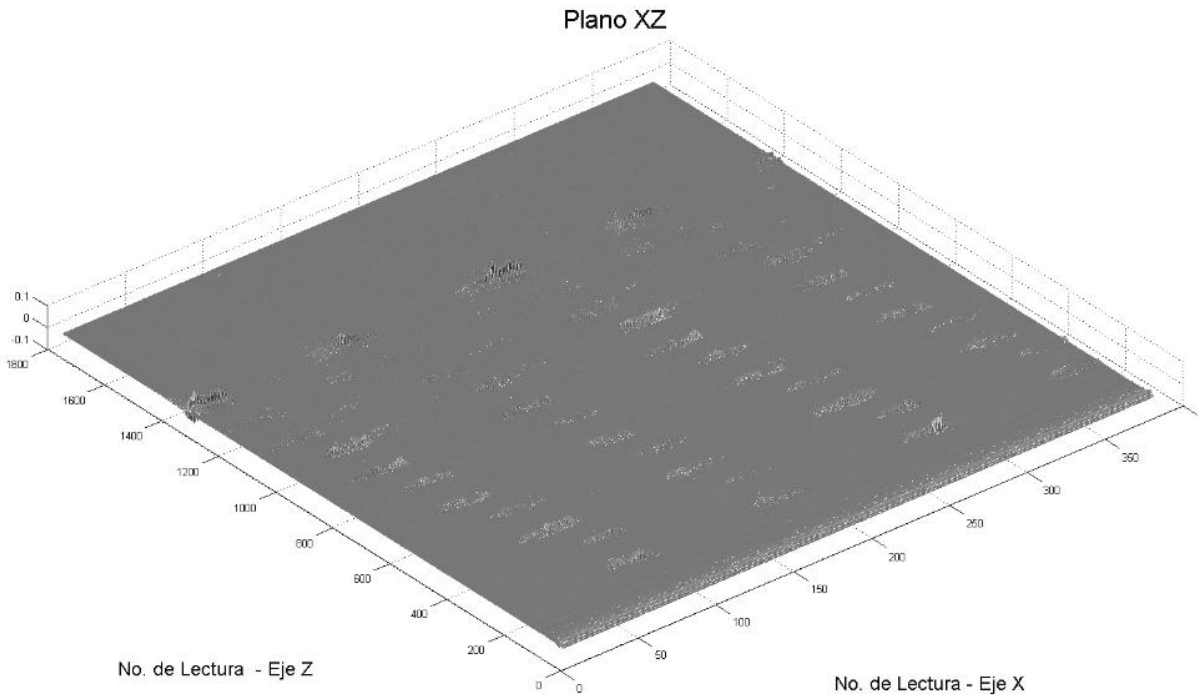


Figura 4.20 Formas de onda obtenidas para adquisición en el plano XZ con la escalera de acrílico

Finalmente se hizo la prueba para formar un volumen, esto se obtuvo configurando los datos en el software para que obtuviera en los ejes X, Y y Z.

La adquisición obtenida para tres ejes para la escalera de acero consistió en 135 muestras para el eje x, 13 para el eje y y 3 para el eje z con una distancia entre muestras de 800 micras, 3mm y 80 micras respectivamente.

La figura 4.21 presenta el resultado para esta adquisición.

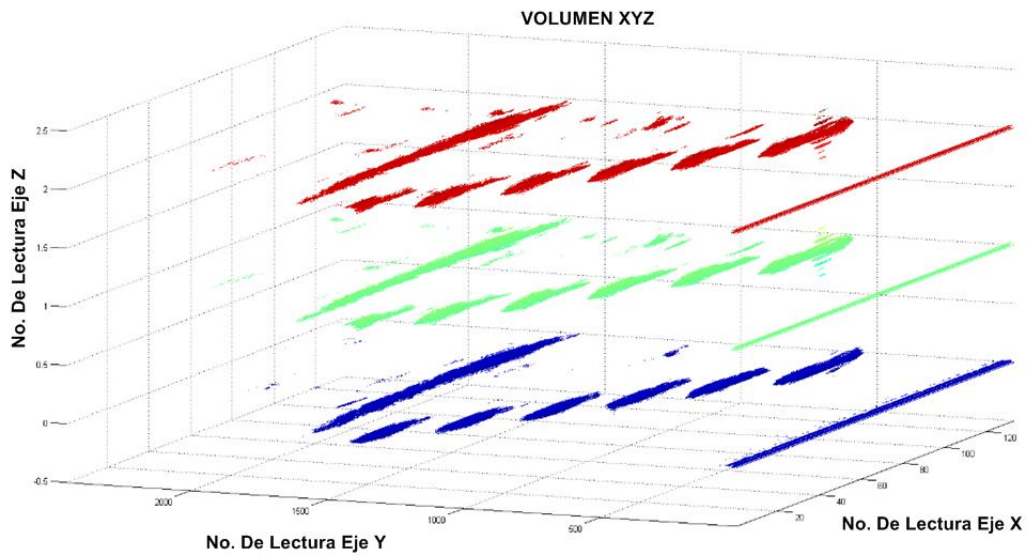


Figura 4.21 Formas de onda obtenidas para adquisición en 3 ejes (XYZ) con objeto de acero

Finalmente para obtener el volumen con la escalera de acrílico se tomaron 95 muestras para el eje X, 11 muestras para el eje Y y 4 muestras para el eje Z con una separación entre muestras de 800 micras, 4mm y 60 micras respectivamente.

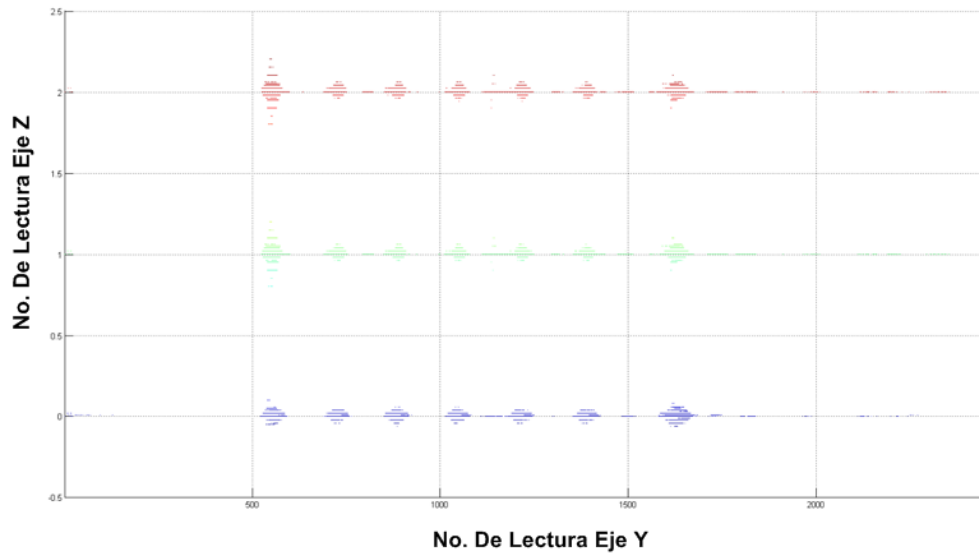


Figura 4.22 Formas de onda obtenidas para adquisición en 3 ejes (XYZ) con objeto de acero

## **CAPITULO 5**

### **Conclusiones**

Se desarrolló un software de control en Labview para un sistema posicionador XYZ el cual realiza barridos mecánicos en cada una estas direcciones y combinaciones de ellas (planos y superficies). El software permite adquirir el eco o la serie de ecos (secuencias de datos ordenados como vectores, matrices y arreglos de matrices) a través de la tarjeta de adquisición de datos del osciloscopio, para posteriormente procesarlos y finalmente desplegar las imágenes en una pantalla.

Para evaluar el desempeño del software se procedió a realizar pruebas para la reconstrucción de un objeto conocido sumergido en un tanque con agua. Se realizaron varias muestras, para poder llevar a cabo la reconstrucción que se deseaba tener, las cuales fueron:

Un eje o A SCAN: Esto para tener como resultado una gráfica en función del tiempo.

Dos ejes o B SCAN: Obtuvimos un resultado en una imagen en dos dimensiones de los datos adquiridos, la cual representa los planos XY y XZ.

Tres ejes o C SCAN: Con este barrido observamos la reconstrucción de 3 planos y así poder obtener una imagen en 3 dimensiones (una superficie).

La alta resolución del transductor utilizado permitió tener resultados muy precisos del elemento reconstruido convirtiendo el sistema y el software en una herramienta muy importante para la investigación de técnicas de exploración no invasivas.

Con esta herramienta es posible determinar la forma, las dimensiones e incluso la ubicación de una obstrucción presente en un espacio definido.

Los resultados experimentales que se observan en el capítulo 4 permiten afirmar que se cumplieron los objetivos planteados en esta tesis, este software es compatible con cualquier sistema de posicionamiento que utiliza el mismo tipo de motor y línea de osciloscopios por lo que es un software portable que puede ser empleado en sistemas más robustos.

## Referencias y bibliografía

[1] Dr. Gilberto González, Dr. Lorenzo Leija, A. Vera. "Hipertermia ultrasónica en el cinvestav". Seminarios Iberoamericanos de Tecnología Informática en Ultrasonido, 28 y 29 de abril de 2005, Coimbra, Portugal, Vol. II, ISBN 85-904054-2-7 CYTED/CNPq.

[2] L.G. Ullate, O. Martinez, M.A.G Izquierdo, M. Parrilla, "Procesamiento digital de señales ultrasónicas en END", Instituto de Automática Industrial, CSIC Madrid España, Artículos Selectos, I Jornadas Iberoamericanas de Ultrasonidos, pp. 161-184.

[3] Vázquez, M, Benítez H., González G., Moreno E., Leija L. "Sistema para la adquisición, procesamiento y despliegue de ecos ultrasónicos en modo B" 9a Conferencia de Ingeniería Eléctrica, CIE2003, México, D. F., 3-5 septiembre del 2003, pp. 451-458.

[4] Marissa A. Rivera Cardona, Fernando Reiszal Pereira, Wagner C.A. Pereira, João Carlos Machado, "Phantoms para ultrasonido con variación continua de la velocidad de propagación de la Onda", Revista Mexicana de Ingeniería Biomédica, Volumen 23, número 1, Marzo 2002.

[5] Mercedes Granda Miguel y Elena Mediavilla Bolado, Instrumentación Electrónica: Transductores y Acondicionadores de Señal, Santander Publican, Ediciones de la Universidad de Cantabria, 2010.

[6] Joan Mendez, "Arreglo de transductores de PVDF para la estimación de la distribución de temperaturas en phantom de tejido suave", Universidad Nacional Autónoma de México, Tesis para obtener el grado de Ingeniero en computación, México D.F. 2012.



[7] NDT Resource center:

<http://www.ndt->

[d.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/Physics/defectdetect.htm](http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/Physics/defectdetect.htm)

[8] Vázquez Zamora Amado, “Diseño, construcción y caracterización de un transductor ultrasónico angulado para aplicaciones médicas”, Universidad Nacional Autónoma de México, tesis para obtener título de Ingeniero eléctrico-electrónico, México D.F. 2011.

[9] Rubio Carlos, Marrero Obdulio, “Fabricación de Transductores Ultrasónicos para Equipos automatizados de inspección de líneas de Tuberías”, Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI); Querétaro, México.

[10] NDT Resource center

<http://www.ndt->

[ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/EquipmentTrans/transducertypes.htm](http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/EquipmentTrans/transducertypes.htm)

[11] ONDA CORP: [http://www.ondacorp.com/tecref\\_tutorialhydrophone\\_theory.shtml](http://www.ondacorp.com/tecref_tutorialhydrophone_theory.shtml)

[12] William Hidber Cruz, “Diseño e implementación de una interfaz máquina-usuario en LabView, para el control de un sistema de posicionamiento automatizado, Universidad Nacional Autónoma de México, tesis para obtener el grado de Ingeniero en computación, 2010.

[13] Vázquez Hernández Mónica, González Suárez Gilberto, Leija Salas Lorenzo. "Estimation in Three Dimension of Acoustical Parameters Distributions in Phantoms". Department of Electrical Engineering. CINVESTAV. International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICEEE) and X Conference on Electrical Engineering (CIE 2004) Acapulco, Guerrero; Mexico. September 8-10, 2004. Pp. 539-543. 2004.

[14] ECP WAVES: <https://sites.google.com/site/ecpwaves/fsico-terico/velocidad-de-propagacin-de-la-onda>

[15] Henry Antonio Roncancio, Cifuentes Héctor, "Tutorial de Labview", Universidad Distrital "Francisco Jose de Caldas", 2001.

[16] Gary W. Johnson y Richard Jennings, Labview Graphical Programming, United States of America: McGraw-Hill, 2006.

# **Anexos**

## ANEXO A Hojas de especificaciones de elementos



# Mixed Signal Oscilloscopes

## MSO3000 Series, DPO3000 Series Datasheet



With the MSO/DPO3000 mixed signal oscilloscope series, you can analyze up to 20 analog and digital signals with a single instrument to quickly find and diagnose problems in complex designs. Bandwidths up to 500 MHz and a minimum of 5x oversampling on all channels ensure you have the performance you need for many of today's mainstream applications. To capture long windows of signal activity while maintaining fine timing resolution, the MSO/DPO3000 offers a deep record length of 5 M points standard on all channels.

### Key performance specifications

- 500, 300, 100 MHz bandwidth models
- Bandwidth is upgradable (up to 500 MHz)
- 2 and 4 analog channel models
- 2.5 GS/s sample rate on all channels
- 5 mega-point record length on all channels
- >50,000 wfms maximum waveform capture rate
- Suite of advanced triggers

### Key features

- Wave Inspector® Controls provide easy navigation and automated search of waveform data
- 29 automated measurements, and FFT analysis for simplified waveform analysis
- 16 digital channels (MSO series)

- Mixed signal design and analysis (MSO series)
  - Automated triggering, decode, and search on parallel buses
  - Multichannel setup and hold triggering
  - MagniVu™ high-speed acquisition provides 121.2 ps fine timing resolution on digital channels
- Optional serial triggering and analysis - automated serial triggering, decode, and search options for I<sup>2</sup>C, SPI, CAN, LIN, RS-232/422/485/UART, and I<sup>2</sup>S/LJ/RJ/TDM
- TekVPI® probe interface supports active, differential, and current probes for automatic scaling and units
- 9 in. (229 mm) WVGA widescreen color display
- Small footprint and lightweight – Only 5.8 in. (147 mm) deep and 9 lb. (4 kg)

### Connectivity

- USB 2.0 host port on both the front panel and rear panel for quick and easy data storage, printing, and connecting a USB keyboard
- USB 2.0 device port on the rear panel for easy connection to a PC or direct printing to a PictBridge®-compatible printer
- Integrated 10/100 Ethernet port for network connection and video out port to export the oscilloscope display to a monitor or projector

### Optional application support

- Power analysis
- HDTV and custom video analysis

# Specifications

All specifications apply to all models unless noted otherwise.

## Model overview

	MSO3012 and DPO3012	MSO3014 and DPO3014	MSO3032 and DPO3032	MSO3034 and DPO3034	DPO3052	MSO3054 and DPO3054
Analog channels	2	4	2	4	2	4
Analog bandwidth (-3dB)	100 MHz	100 MHz	300 MHz	300 MHz	500 MHz	500 MHz
Calculated rise time at 5 mV/div, typical	3.5 ns	3.5 ns	1.17 ns	1.17 ns	700 ps	700 ps
Sample rate (analog channels)	2.5 GS/s	2.5 GS/s	2.5 GS/s	2.5 GS/s	2.5 GS/s	2.5 GS/s
Record length	5 M points	5 M points	5 M points	5 M points	5 M points	5 M points
Digital channels	MSO models add 16 digital channels to the corresponding DPO model					

## Vertical system analog channels

### Hardware bandwidth limits

≥300 MHz models	20 MHz and 150 MHz
100 MHz models	20 MHz

Input coupling AC, DC, GND

Input impedance 1 MΩ ±1%, 75 Ω ±1%, 50 Ω ±1%

### Input sensitivity range

1 MΩ	1 mV/div to 10 V/div
75 Ω, 50 Ω	1 mV/div to 1 V/div

Vertical resolution 8 bits (11 bits with Hi Res)

### Maximum input voltage

1 MΩ	300 V <sub>RMS</sub> with peaks ≤ ±450 V
75 Ω, 50 Ω	5 V <sub>RMS</sub> with peaks ≤ ±20 V

DC gain accuracy ±1.5% for 5 mV/div and above  
±2.0% for 2 mV/div  
±2.5% for 1 mV/div

Channel-to-channel isolation Any two channels at equal vertical scale ≥100:1 at ≤100 MHz and ≥30:1 at >100 MHz up to the rated bandwidth

### Offset range

Volts/div setting	Offset range	
	1 MΩ input	50 Ω and 75 Ω input
1 mV/div to 99.5 mV/div	±1 V	±1 V
100 mV/div to 995 mV/div	±10 V	±5 V
1 V/div to 10 V/div	±100 V	±5 V

**Vertical system digital channels**

Thresholds	Threshold per set of 8 channels
Threshold selections	TTL, CMOS, ECL, PECL, User-defined
User-defined threshold range	-15 V to +25 V
Maximum input voltage	-20 V to +30 V
Threshold accuracy	$\pm[100 \text{ mV} + 3\% \text{ of threshold setting}]$
Maximum input dynamic range	50 V <sub>p-p</sub> (threshold setting dependent)
Minimum voltage swing	500 mV <sub>p-p</sub>
Input resistance	101 k $\Omega$
Probe loading	8 pF
Vertical resolution	1 bit

**Horizontal system analog channels**

Maximum duration of time captured at highest sample rate (all channels)	2 ms
Seconds/division range	1 ns/div to 1000 s/div
Time-base delay time range	-10 divisions to 5000 s
Channel-to-channel deskew range	$\pm 100 \text{ ns}$
Time base accuracy	$\pm 10 \text{ ppm}$ over any $\geq 1 \text{ ms}$ interval

**Horizontal system digital channels**

Seconds/division range	1 ns/div to 1000 s/div
Maximum record length (main, all channels)	5 M points
Maximum sample rate (MagniVu, all channels)	8.25 GS/s (121.2 ps resolution)
Maximum record length (MagniVu, all channels)	10 k points centered on the trigger
Minimum detectible pulse width	2.0 ns
Channel-to-channel skew	500 ps, typical, digital channel to digital channel only This is the propagation path skew and ignores skew contributions due to bandpass distortion, threshold inaccuracies (see Threshold accuracy), and sample binning (see Digital channel timing resolution)



## HNC Hydrophones

The HNC Series needle hydrophones are excellent sensors for laboratory use in ultrasonic field mapping, with pinpoint access and good spatial resolution. They exhibit higher sensitivity than the HNP series, with decreased sensitivity flatness and slightly narrower directivity.

### Features

- Small size
- High sensitivity
- Range of apertures available
- Very stable
- Low cost

### Technical Specifications

	HNC-0200	HNC-0400	HNC-1000	HNC-1500
Frequency range ( $\pm 6\text{dB}$ )	1 - 10 MHz			
* EOC Nominal Sensitivity (nV/Pa)	45	170	780	1200
* EOC Nom. Sens. [dB re 1V/uPa]	-267	-255	-242	-238
Acceptance angle (-6dB at 5 MHz)	90°	60°	25°	15°
Capacitance [pF]	70	70	90	100
Max. Operating Temperature	50°C			

\* EOC ("end of cable") is the open-circuit output sensitivity of the hydrophone. Calibration with an amplifier can be determined from the gain and input impedance of the amplifier.

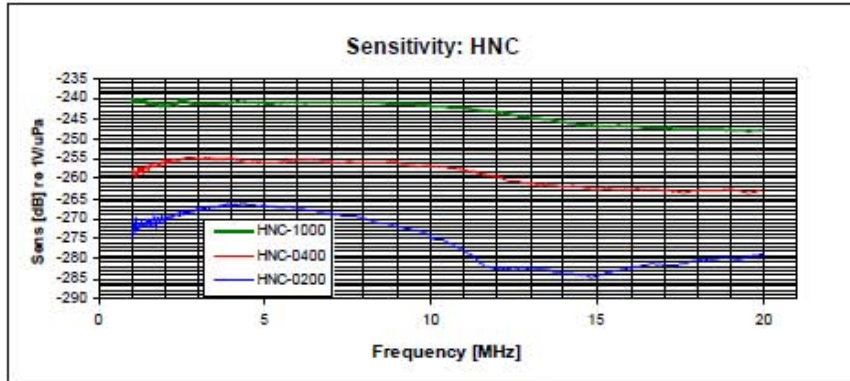
Provided with traceable calibration 1-20 MHz at 50 KHz intervals. For other calibrations available visit our web site.

Specifications are subject to change without notice.

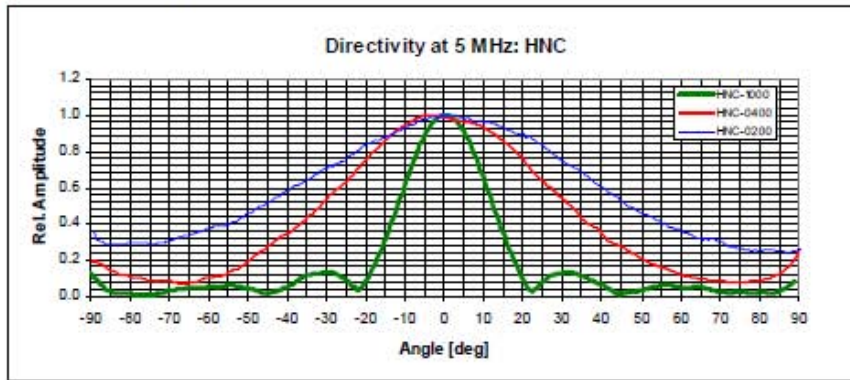


HNC Hydrophone

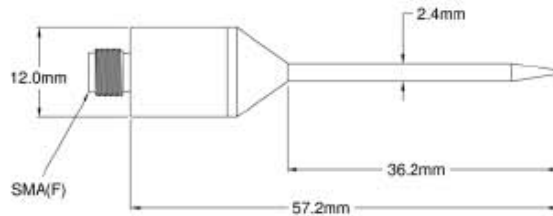
### Typical Sensitivity Plot



### Typical Directivity Plot



### Mechanical Specifications





## ANEXO B Propiedades acústicas de sólidos



Onda Corporation  
592 Weddell Drive, Suite 7, Sunnyvale, CA 94089  
PH: (408) 745 - 0383 FAX: (408) 745 - 0956

## Acoustic Properties of Solids

Ref	Material	Vendor	VL mm/* s	VS mm/* s	** g/cm3	ZL MRayl	**	Loss dB/cm
AS	Alumina	Mason	10.52		3.86	40.6		
CRC	Aluminum - rolled		6.42	3.04	2.70	17.33	0.355	
RLB	Aluminum - 6262-T9		6.38		2.73	17.41		
	AMD Res-in-all - 502/118, 5:1	AMD	2.67		1.35	3.61		
	AMD Res-in-all - 502/118, 9:1	AMD	2.73		1.35	3.68		
JA	Araldite - 502/956	Ciba	2.62		1.16	3.04		
JA	Araldite - 502/956, 10phe C5W	Ciba,Li	2.60		1.23	3.19		
JA	Araldite - 502/956, 20phe C5W	Ciba,Li	2.54		1.39	3.52		
JA	Araldite - 502/956, 30phe C5W	Ciba,Li	2.41		1.50	3.62		
JA	Araldite - 502/956, 40phe C5W	Ciba,Li	2.31		1.67	3.86		
JA	Araldite - 502/956, 50phe C5W	Ciba,Li	2.13		1.95	4.14		
JA	Araldite - 502/956, 60phe C5W	Ciba,Li	2.10		2.24	4.70		
JA	Araldite - 502/956, 70phe C5W	Ciba,Li	1.88		3.17	5.95		
JA	Araldite - 502/956, 80phe C5W	Ciba,Li	1.72		4.71	8.11		
JA	Araldite - 502/956, 50phe 325mesh W	Ciba,Li	2.16		2.86	6.17		
JA	Araldite - 502/956, 60phe 325mesh W	Ciba,Li	1.91		2.78	5.33		
JA	Araldite - 502/956, 70phe 325mesh W	Ciba,Li	1.82		3.21	5.84		
JA	Araldite - 502/956, 80phe 325mesh W	Ciba,Li	1.64		4.55	7.45		
JA	Araldite - 502/956, 90phe 325mesh W	Ciba,Li	1.52		8.40	12.81		
AS	Arsenic tri sulphide As2 S3	Ch	2.58	1.40	3.20	8.25	0.29	
	Bacon P38	Bacon	4.00	2.17	1.90	7.60	0.29	13.5 @ 5
M	Bearing babbit		2.30		10.1	23.2		
CRC	Beryllium		12.89	8.88	1.87	24.10	0.046	
	Bismuth		2.2	1.1	9.8	21.5	0.33	
	Boron carbide		11.0		2.4	26.4		
PK	Boron nitride		6.03	3.88	1.065	0.88		
	Brass - yellow, 70% Cu, 30% Zn		4.70	2.10	8.64	40.6	0.38	
	Brick		4.3		1.7	7.4		
	Cadmium		2.8	1.5	8.6	24.0	0.30	
AS	Carbon -pyrolytic, soft, variable properties		3.31		2.21	7.31		
AS	Carbon - vitreous, very hard material	FI	4.26	2.68	1.47	6.26	0.17	



Onda Corporation  
592 Westfield Drive, Suite 7, Sunnyvale, CA 94089  
PH: (408) 745 - 0363 FAX: (408) 745 - 0956

# Acoustic Properties of Solids

Ref	Material	Vendor	VL mm/* s	VS mm/* s	** g/cm3	ZL MRayl	**	Loss dB/cm
AS	DER332 - 50phr V140, rt cure	E,GM	2.94	0.97	1.13	2.64	0.40	
AS	DER332 - 64phr V140, rt cure	E,GM	2.36		1.13	2.65		
AS	DER332 - 75phr V140, rt cure	E,GM	2.35		1.12	2.62		
AS	DER332 - 100phr V140, rt cure	E,GM	2.32		1.10	2.55		
AS	DER332 - 100phr V140, 30phr LP3, r6	E,GM,T	2.27	1.13	2.55			7.5 @ 2, 11.2 @ 2.5
AS	DER332 - 100phr V140, 30phr LP3, r6	E,GM,T	2.36		1.16	2.74		9.6 @ 2
AS	DER332 - 100phr V140, 50phr LP3, r6	E,GM,T	2.32		1.13	2.63		12.0 @ 2
AS	DER332 - 50phr V140, 50phr St. Hellens Ash, 60°C	E,GM,?	2.43		1.94	6.24		
CRC	Duralumin 17S		6.32	3.13	2.79	17.63	0.34	
AS	Duxseal	JM	1.49		1.68	2.50		13.3 @ 0.5
AS	E.pox.e glue, EPX-1 or EPX-2, 100phA of B	Loc	2.44		1.10	2.68		8.4 @ 5
AS	Ecosorb - CR 124 - 2PHX of Y	EC	2.62		4.59	12.01		9.4 @ 5
AH	Ecosorb - MF 110	EC	2.61		1.60	4.20		
AH	Ecosorb - MF 112	EC	2.40		2.19	5.25		
AH	Ecosorb - MF 114	EC	2.29		2.90	6.65		
AH	Ecosorb - MF 116	EC	2.45		3.69	9.02		
AH19	Ecosorb - MF 124	EC	2.60		4.50	12.0		
AS	Ecosorb - MF 190	EC	2.67		4.45	11.88		15.9 @ 4
	Epon - 828, mpda	Sh,D	2.829	1.23	1.21	3.4	0.45	
	Epotek - 301	Wa	2.64		1.08	2.85		
	Epotek - 330	Wa	2.57		1.14	2.94		
	Epotek - H70S	Wa	2.61		1.68	4.88		
AS	Epotek - V6, 10phA of B, r6	Wa	2.61		1.23	3.21		4.5 @ 2
AS	Epotek - V6, 10phA of B, r7	Wa	2.55		1.23	3.14		8 @ 2
AS	Epotek - V6, 10phA of B, 20phA LP3, r6	Wa,T	2.60		1.25	3.25		6 @ 2
AS	Epotek - V6, 10phA of B, 20phA LP3, r7	Wa,T	2.55		1.26	3.22		6 @ 2
DYNA	Fused silica	Dyna	5.70	3.75	2.20	12.55	0.17	6.2e-5 @ 2
M	Germanium, mp=937.4°C, transparent to infrared	C	5.41		5.47	29.6		
	Glass - coming 0215 sheet	Com	5.66		2.49	14.09		
	Glass - crown	RG	5.1	2.8	2.24	11.4	0.28	



Onnda Corporation  
592 Weddell Drive, Suite 7, Sunnyvale, CA 94089  
PH: (408) 745-0383 FAX: (408) 745-0956

# Acoustic Properties of Solids

Ref	Material	Vendor	VL mm <sup>3</sup> s	VS mm <sup>3</sup> s	** g/cm3	ZL MRayl	**	Loss dB/cm
RLB	Hysol R9-2039/3561, 427phr W03	H.A	2.15		3.51	7.54		33.5 @ 5
	Ice		3.99	1.08	0.917	3.66	0.34	
	Inconel		5.7	3.0	8.28	47.2	0.31	
	Indium	I	2.56		7.3	18.7		
	Iron		5.9	3.2	7.69	46.4	0.29	
	Iron - cast		4.6	2.6	7.22	33.2	0.27	
	Lead		2.2	0.7	11.2	24.6	0.44	
	Lead metaniobate	Kera	3.30		6.2	20.5		Q = 15
	Lithium niobate - 38°C, rotated Y-cut	CT	7.08		4.7	33.0		
	Magnesium - various types listed in ref "M"		5.8	3.0	1.738	10.0	0.32	
AE	Marble		3.8		2.8	10.5		
	Mylubrium		0.3	3.4	10.0	63.1	0.28	
	Monel		5.4	2.7	8.82	47.6	0.33	
	Nickel		5.6	3.0	8.84	49.5	0.30	
M	Niobium, m.p. = 2468°C	C	4.92	2.10	8.57	42.2	0.39	
AS	Paraffin		1.94		0.91	1.76		10.5 @ 1
RLB	Phillips 66 "Crystalor"	Ph	2.17	1.03	0.83	1.79	0.36	5.3 @ 5
CRC	Platinum		3.28	1.73	21.4	66.8	0.32	
RLB	Poco - DFP-1	Uno	3.09	1.73	1.81	5.61	0.27	1.2 @ 5
RLB	Poco - DFP-1C	Uno	3.20	1.81	3.20	11.0	0.31	2.0 @ 5
	Polyester casting resin	Tap	2.29		1.07	2.86		
AE	Porcelain		5.9		2.3	13.5		
	PSN, potassium sodium niobate		6.94		4.46	31.0		
	Pressed graphite		2.4		1.8	4.1		
	PZT 5H - Vemtron	EBL	4.44		7.43	33.0		
AS	PZT - Murata	Mura	4.72		7.96	37.5		
	PVDF	3M	2.30		1.79	4.2		Q = 10
KF	Quartz - X-cut	VF	5.75	2.2	2.65	15.3	0.42	
AS	Resin Formulators - RF 5407	EV	3.06		2.16	6.61		14.9 @ 5
AS	Resin Formulators - RF 5407, 30 PHR LP3	EV	2.56		1.92	4.92		54.7 @ 5
M	Rubidium, m.p.=38.9, a "getter" in vacuum tubes	C	1.26		1.53	1.93		



Onda Corporation  
592 Weddell Drive, Suite 7, Sunnyvale, CA 94089  
PH: (408) 745 - 0383 FAX: (408) 745 - 0956

## Acoustic Properties of

## Liquids

Ref	Liquid	Vendor	$V_L$ mm/μs	$c$ m/s °C	$\rho$ g/cm <sup>3</sup>	$Z_L$ MRayl	$\rho c$ 10 <sup>-16</sup> s <sup>2</sup> /m
M	Acetate, butyl		1.27		0.871	1.02	
M	Acetate, ethyl, C4H8O2		1.19		0.900	1.069	
M	Acetate, methyl, C3H6O2		1.21		0.934	1.131	
M	Acetate, propyl		1.18		0.891	1.05	
LB	Acetone, (CH3)2CO at 25°C		1.174	-4.5	0.791	1.07	54.0
M	Acetonitrile, C2H3N		1.29		0.783	1.01	
M	Acetonyl acetone, C6H10O2		1.40		0.729	1.359	
M	Acetylendichloride, C2H2Cl2		1.02		1.26	1.280	
M	Alcohol, butyl, C4H9OH at 30°C		1.24		0.810	1.003	74.3
CRC	Alcohol, ethanol, C2H5OH, at 25°C		1.207	-4.0	0.79	0.95	48.5
M	Alcohol, furfuryl, C5H4O2		1.45		1.135	1.645	
LB	Alcohol, isopropyl, 2-Propanol, at 20°C		1.17		0.786	0.920	92.0
CRC	Alcohol, methanol, CH3OH, at 25°C		1.103	-3.2	0.791	0.872	30.2
M	Alcohol, propyl (n) C3H7OH at 30°C		1.22		0.804	0.983	64.5
M	Alcohol, t-amyl, C5H9OH		1.20		0.810	0.976	
M	Alkazene 13, C15H24		1.32		0.860	1.132	
M	Aniline, C6H5NH2		1.69		1.022	1.675	
DR	Argon, liquid at 87K		0.840		1.43	1.20	15.2
CRC	Benzene, C6H6, at 25°C		1.295	-4.65	0.87	1.12	873.0
M	Benzol		1.33		0.878	1.16	
M	Benzol, ethyl		1.34		0.868	1.16	
	Bromobenzene C6H5Br at 22°C		1.167		1.522	1.776	1.63.0
M	Bromoform, CHBr3		0.92		2.890	2.670	
M	t-Butyl chloride, C4H9Cl		0.98		0.84	0.827	
M	Butyrate, ethyl		1.17		0.877	1.03	
M	CARBITOLTM, C6H14O3		1.46		0.988	1.431	
CRC,M	Carbon disulphide, CS2 at 25°C		1.149		1.26	1.448	
DR	Carbon disulphide, CS2, 25°C, 3 GHz		1.310		1.221	1.65	10.1
CRC,M	Carbon tetrachloride, CCl4, at 25°C		0.926	-2.7	1.594	1.48	538.0
M	Cesium at 28.5°C the melting point		0.967		1.88	1.82	
LB	Chloro-benzene, C6H5Cl, at 22°C		1.304		1.106	1.442	167.0



Onda Corporation  
 592 Weddell Drive, Suite 7, Sunnyvale, CA 94089  
 PH: (408) 745 - 0383 FAX: (408) 745 - 0956

## Acoustic Properties of

## Liquids

Ref	Liquid	Vendor	$V_L$ mm <sup>3</sup> /s	$\frac{dV_L}{dT}$ m <sup>3</sup> /s °C	$\rho$ g/cm <sup>3</sup>	$Z_L$ MRayl	$\frac{dZ_L}{dT}$ 10 <sup>-15</sup> s <sup>2</sup> /m
JA	Glycol - polyethylene 200	SW	1.62		1.087	1.75	
JA	Glycol - polyethylene 400	SW	1.62		1.06	1.71	
M	Glycol - polypropylene (Polyglycol P-400) at 38°C		1.30				
M	Glycol - polypropylene (Polyglycol P-1200) at 38°C		1.30				
M	Glycol - polypropylene (Polyglycol E-200) at 29°C		1.57				
M	Glycol - tetraethylene C8H18O6		1.58		1.12	1.784	
M	Glycol, triethylene, C6H14O4		1.61		1.123	1.81	
DR	Helium-4, liquid at 0.4K		0.238		0.147	0.035	1.73
DR	Helium-4, liquid at 2K		0.227		0.145	0.033	70.0
DR	Helium-4, liquid at 4.2K		0.183		0.126	0.023	226.0
	n-Hexane, C6H14, liquid at 30°C		1.103		0.659	0.727	87.0
M	n-Hexanol, C6H14O		1.30		0.819	1.065	
AS	Honey, sue bee orange		2.03		1.42	2.89	
	Hydrogen, liquid at 20°K		1.19		0.07	0.08	5.6
LB	Iodo-benzene, C6H5I, at 22°C		1.104		1.183	2.012	242.0
M	Isopentane, C5H12		0.992		0.62	0.615	
CRC,M	Kerosene		1.324	-3.6	0.81	1.072	
M	Linalool		1.40		0.884	1.23	
CRC	Mercury at 25.0°C		1.450		13.5	19.58	5.8
M	Mesityloxiide, C6H16O		1.31		0.85	1.115	
M	Methylethylketone		1.21		0.805	0.972	
M	Methylene iodide		0.98				
M	Methyl naphthalene, C11H10		1.51		1.090	1.645	
M	Monochlorobenzene, C6H5Cl		1.27		1.107	1.411	
M	Morpholine, C4H9NO		1.44		1.00	1.442	
DR	Neon, liquid at 27K		1.20		1.20	0.72	23.1
LB	Nicotin, C10H14N2, at 20°C		1.49		1.01	1.505	
CRC,M	Nitrobenzene, C6H6NO2, at 25°C		1.463	-3.6	1.20	1.756	
DR	Nitrogen N2, liquid at 77K		0.860		0.80	0.68	13.8
M	Nitromethane CH3NC2		1.33		1.13	1.504	
JA	Oil - baby	J&J	1.43		0.821	1.17	



Onda Corporation  
 592 Weddell Drive, Suite 7, Sunnyvale, CA 94089  
 PH: (408) 745 - 0383 FAX: (408) 745 - 0056

## Acoustic Properties of

## Liquids

Ref	Liquid	Vendor	$V_L$ mm <sup>3</sup> /s	$\frac{c}{\rho}$ m/s °C	$\rho$ g/cm <sup>3</sup>	$Z_L$ MRayl	$\frac{c^2}{\rho}$ 10 <sup>15</sup> s <sup>2</sup> /m
M	Polypropylene oxide (Ambifo) at 38°C		1.37				
M	Potassium at 100°C, mp=83.7°C ('M' other temps)		1.82		0.83	1.51	
M	Pyridine		1.41		0.982	1.39	
M	Sodium, liquid at 300°C (see 'M' for other temps)		2.42		8.81	21.32	
M	Solvesso #3		1.37		0.877	1.202	
AS	Sonotrack couplant	Echo	1.62		1.04	1.68	
M	Tallow at 16°C		0.39				
M	Thallium, mp=303.5°C, used in photocells	C	1.62		11.9	19.3	
M	Trichorethylene		1.05		1.05	1.10	
CRC	Turpentine, at 25°C		1.255		0.88	1.104	
M	Univis 800		1.35		0.87	1.191	
M	Water - heavy, D2O		1.40		1.104	1.54	
M	Water - liquid at 20°C		1.48		1.00	1.483	
CRC,DR	Water - liquid at 25°C		1.4967	2.4	0.998	1.494	22.0
	Water - liquid at 30°C		1.509		1.00	1.509	19.1
DR	Water - liquid at 60°C (temps to 500°F in 'CRC')		1.55		1.00	1.55	10.9
M	Water - salt 10%		1.47				
M	Water - salt 15%		1.53				
M	Water - salt 20%		1.60				
CRC	Water - sea, at 25°C		1.531	2.4	1.025	1.569	
DR	Xenon - liquid at 166K		0.630		2.86	1.80	22.0
CRC,M	Xylene Hexafluoride, C8H4F6, at 25°C		0.879		1.37	1.222	
M	m-Xylol, C8H10		1.32		0.864	1.145	

## ***ANEXO C Descripción del código***

El panel principal (figura A.1a) está controlado mediante un ciclo while y un cuadro de eventos (figura A.1b y A.1c). Las principales acciones que se realizan en esta parte son:

- Al ejecutar el programa, lo primero que se hace es crear un archivo donde se van guardando las diferentes variables que se ocupan durante la ejecución. Como son la ruta de los directorios donde se guardan los datos, las posiciones de los motores, los nombres de los dispositivos de control y adquisición. Esto se hace tener almacenados los datos de la última ejecución que se realizó.
  
- En el cuadro de eventos se manejan las opciones de la barra de menús, cada vez que se realiza alguna acción en la barra, activamos un evento, lo que obliga a ejecutar una tarea en específico. La estructura de eventos se encuentra dentro de un ciclo while, esto para ejecutarla continuamente mientras el programa principal este en ejecución. El ciclo termina cuando seleccionamos la opción salir del menú, o de la ventana principal. Dentro del cuadro de eventos, la mayoría del código son subVIs, es decir son rutinas independientes que se mandan a llamar al ejecutar cierto evento.
  
- El panel de mensajes es controlado mediante un ciclo while. Cada vez que ocurre cierto evento durante la ejecución del programa, este guarda cierto mensaje dentro de una cola, la cual se va almacenando dentro de un arreglo de datos, para posteriormente guardarlos en un archivo de texto. El ciclo while termina cuando cerramos el panel principal.

El VI “guardar” (figura A.2a) lo ocupamos cuando estamos haciendo las adquisiciones en modo manual y queremos almacenar los datos que se estén recopilando. En la figura A.2b, podemos observar el diagrama de bloques de este cuadro de diálogo, lo que hace es pasar únicamente el nombre del archivo al VI mostrado en la figura A.3. Este VI manda el valor de guardar al VI OSciloscopioSC.vi, el cual guarda los datos que se estén adquiriendo en ese momento. OSciloscopio.vi, es el VI encargado de hacer la comunicación con el osciloscopio. En la figura A.4b se muestra el código para el panel tipo de barrido Figura A.4a. La figura A.5b muestra el código para el panel configuración (figura A.5a). La figura A.6 muestra el diagrama de flujo del VI encargado del control del barrido para las adquisiciones.



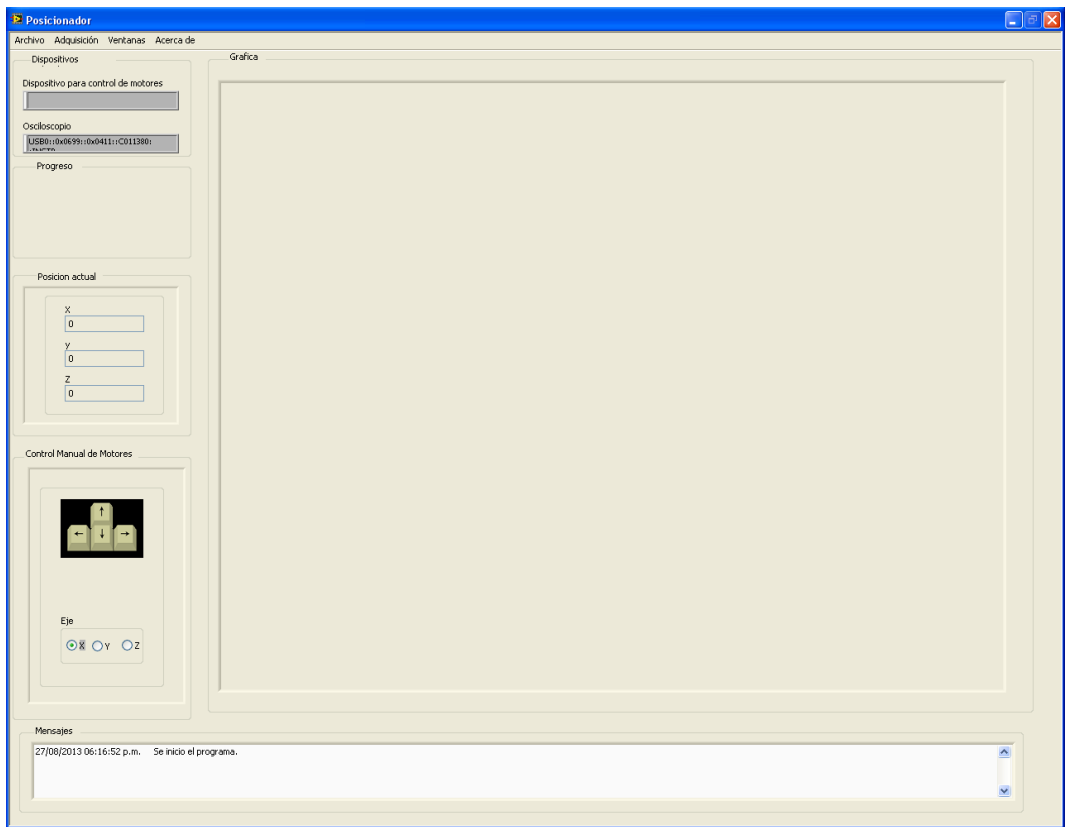


FIGURA A. 1. Panel principal

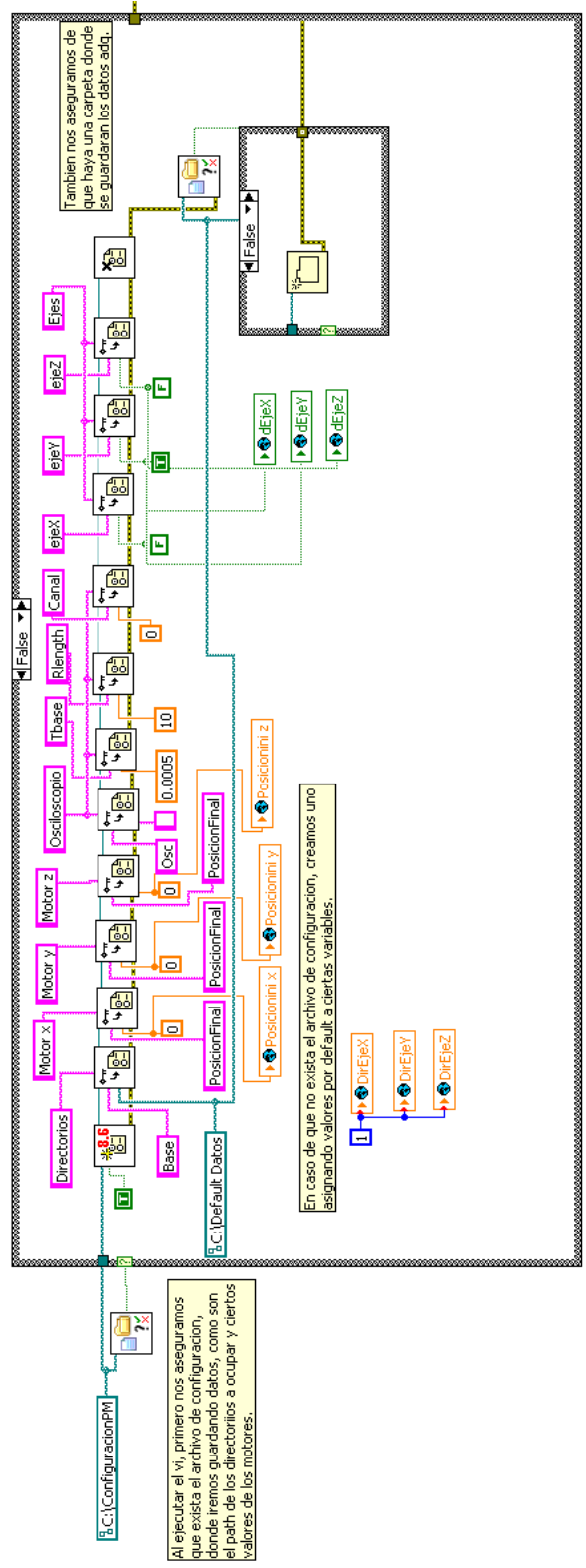


Figura A. 1b Diagrama de bloques del panel principal. a) Sección 1. Creación del archivo de configuración



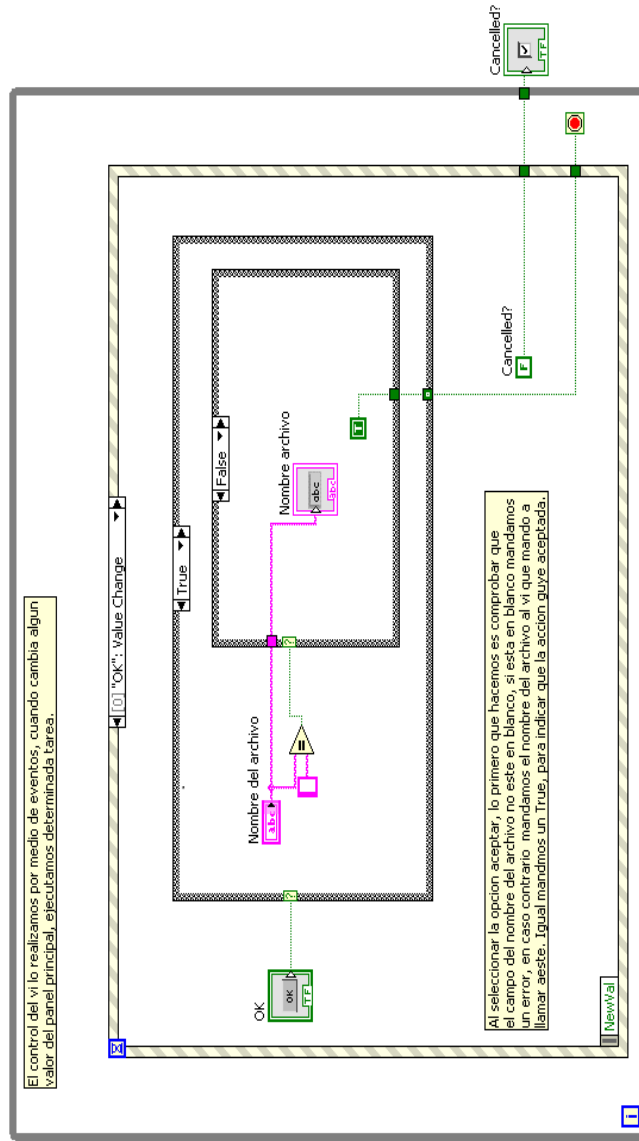
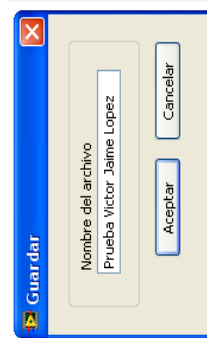


Figura A.2 a) Cuadro de dialogo guardar. b) Diagrama de bloques del cuadro de dialogo guardar.

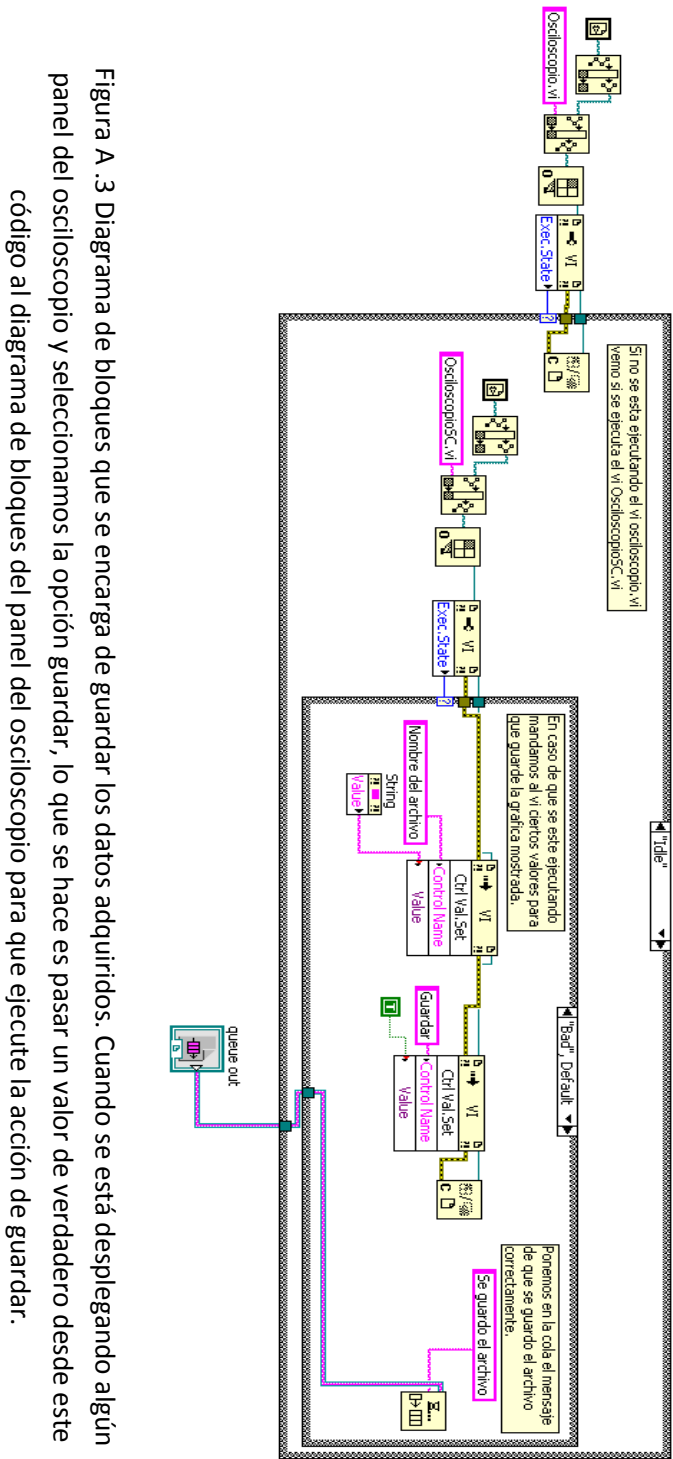


Figura A. 3: Diagrama de bloques que se encarga de guardar los datos adquiridos. Cuando se está desplegando algún panel del osciloscopio y seleccionamos la opción guardar, lo que se hace es pasar un valor de verdadero desde este código al diagrama de bloques del panel del osciloscopio para que ejecute la acción de guardar.

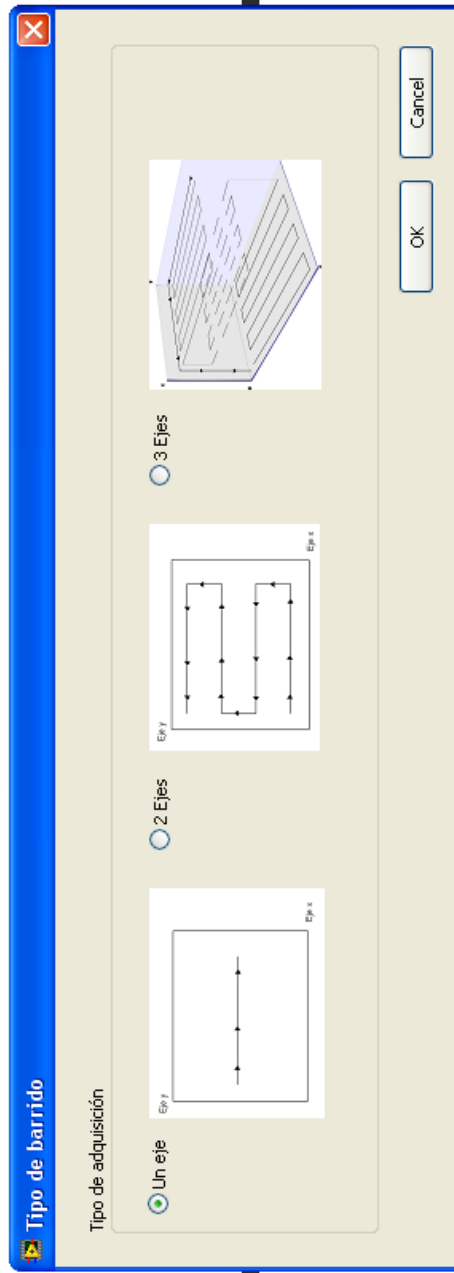


Figura A. 4 a) Tipo de barrido

El VI trabaja con eventos, dependiendo de la opción seleccionada ejecutamos determinada acción.

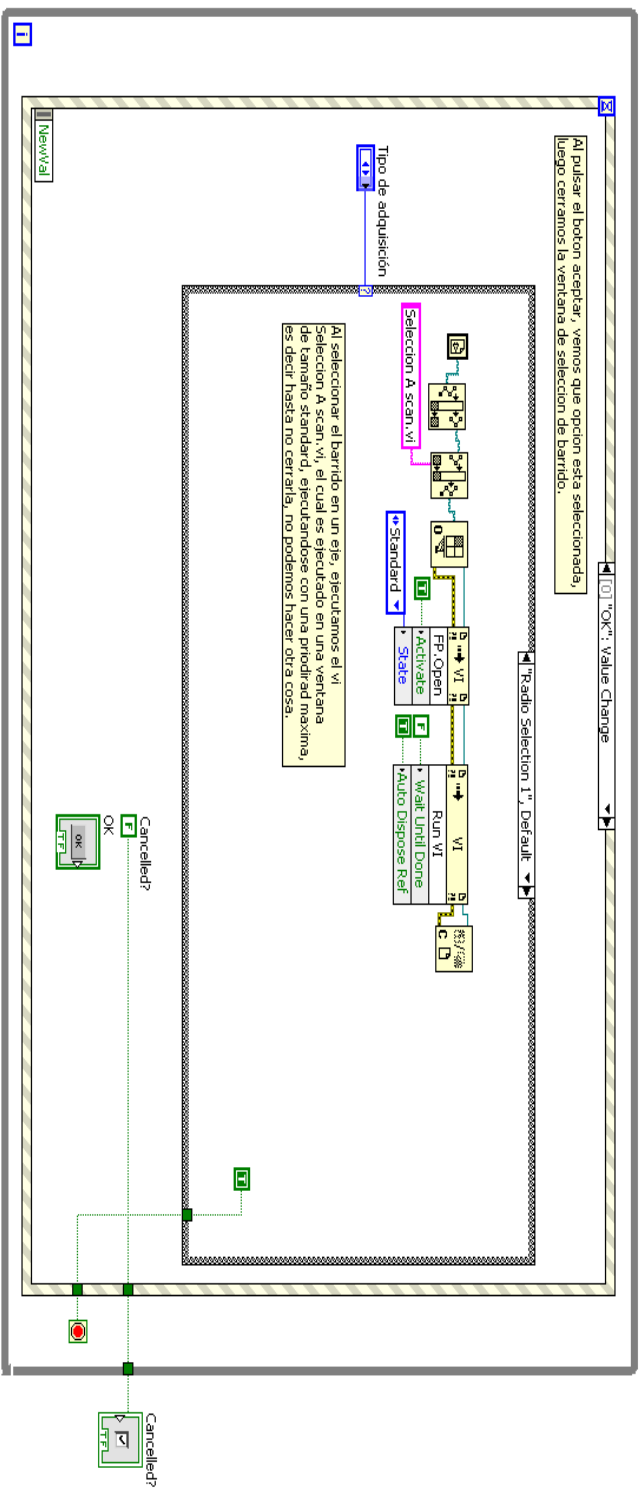


Figura A 4 b) Diagrama de bloques del panel "Tipo de barrido" funciona a través de eventos dependiendo de la selección que hayamos efectuado, se manda a llamar el VI correspondiente y se cierra este.

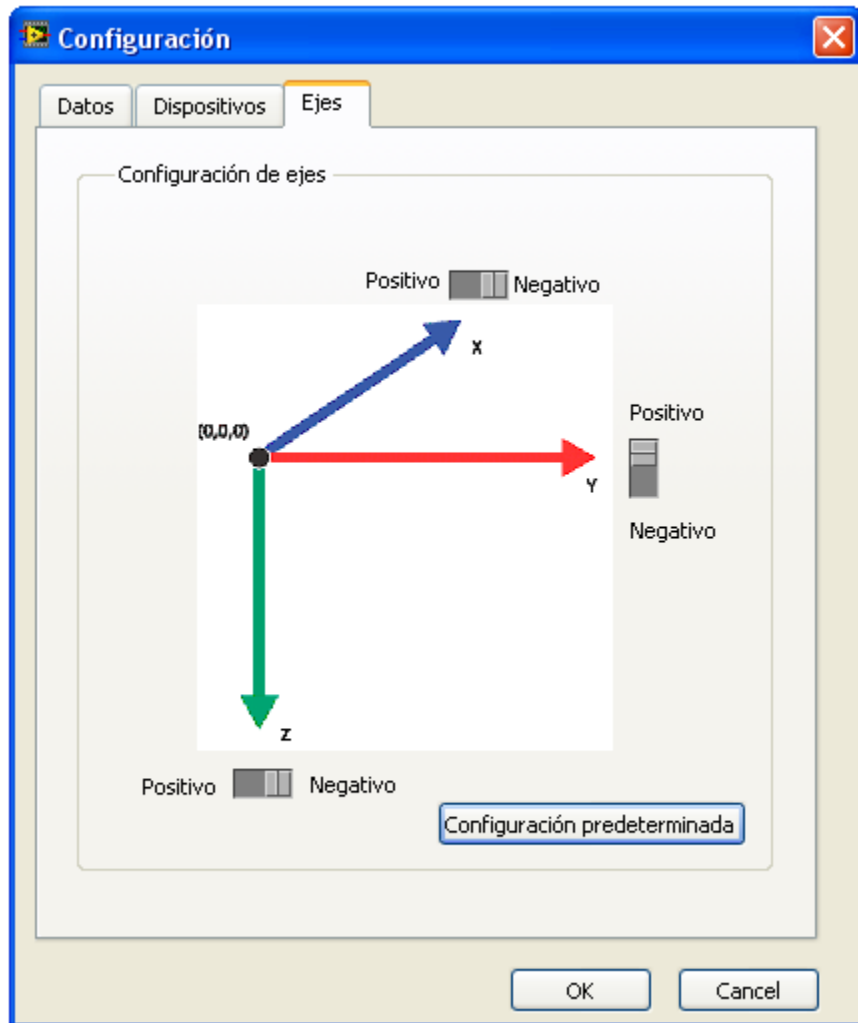


Figura A 5a Panel de configuración



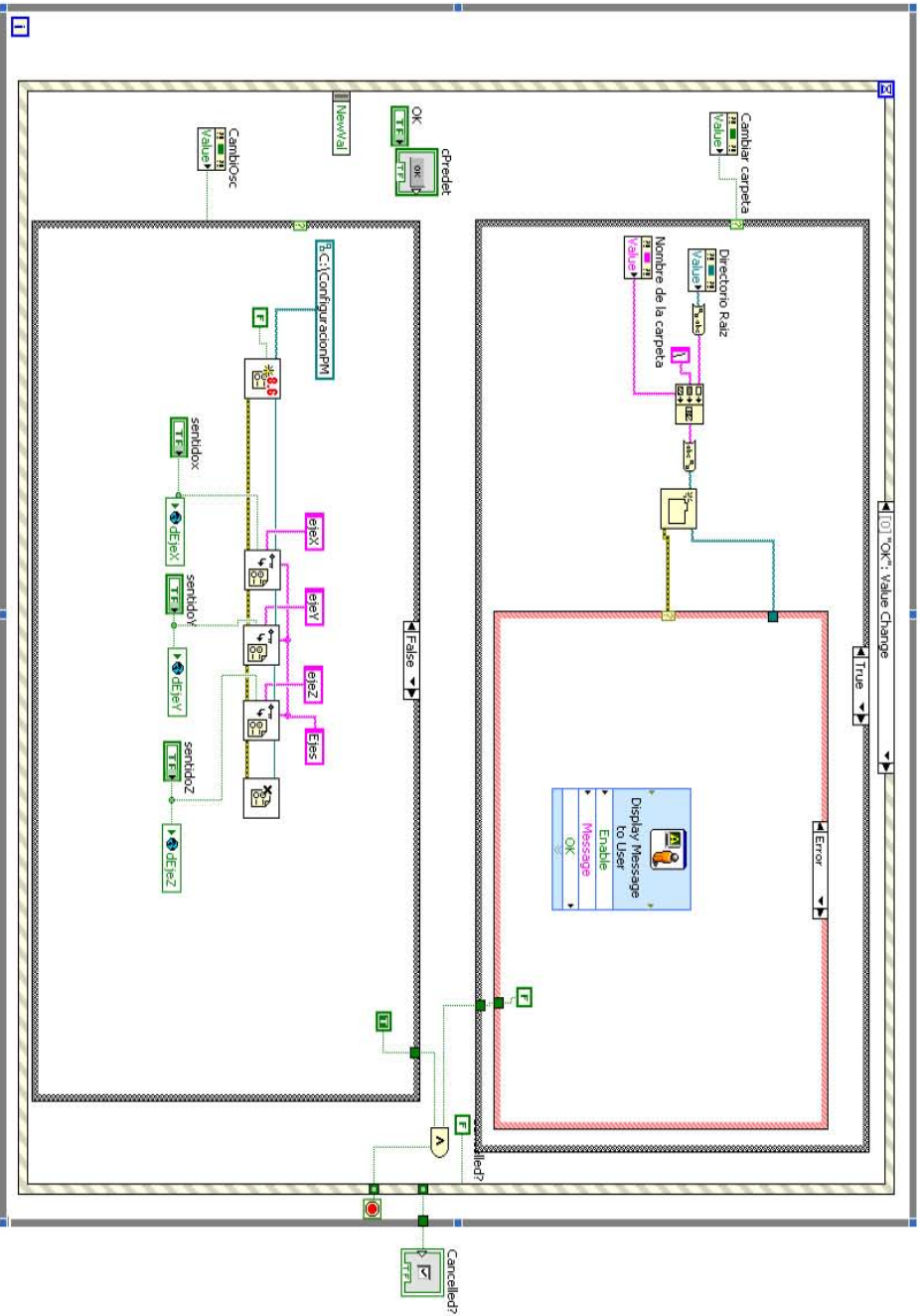


Figura A 5b) Diagrama de bloques del panel “Configuración”, su funcionamiento se basa en eventos, los cambios se guardan únicamente al seleccionar el botón “aceptar” del panel frontal, los cambios son guardados en un archivo de configuración para su uso posterior.