



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**IMPLEMENTACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UN  
DISPOSITIVO DE POSICIONAMIENTO MECÁNICO,  
PARA DESPLAZAMIENTOS DE BAJA ESCALA**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES**

**P R E S E N T A:**

**FRANCISCO JAVIER ALVAREZ RAMIREZ**



**DIRECTOR DE TESIS:  
DR. GABRIEL EDUARDO SANDOVAL ROMERO**

Ciudad Universitaria

2015

## **Agradecimientos**

Al Dr. Gabriel Eduardo Sandoval Romero por permitirme trabajar en este proyecto (PAPIIT-IT101712), dándome la confianza y compartiendo sus ideas para la elaboración de la tesis. Además por impulsarme a seguir con mis estudios de posgrado.

A mis sinodales: Ing. Margarita Bautista González, M.I. Rigel Gámez Lea, M.I. Selene Pérez García, Dra. Mónica Vázquez Hernández; por el tiempo tomado en la revisión de la tesis y por las observaciones realizadas para mejorar mi trabajo.

A la Dirección General de Asuntos del Personal de Académico (DGAPA), de la UNAM, por el apoyo brindado mediante la beca del Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT), en el proyecto PAPIIT- IT101712 titulado: “Sensor de ultrasonido de alta intensidad basado en fibra óptica, utilizado en aplicaciones biomédicas”.

Al Colegio de México A. C., por el apoyo otorgado mediante la beca dentro del proyecto titulado “Desarrollo de un esquema de evaluación de los beneficios socio-ambientales del programa de Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos (PSAH) en el Suelo de Conservación del Distrito Federal” número 155039 de Ciencia Básica CONACYT.

## **Objetivo**

El objetivo principal de esta tesis, consiste diseñar y fabricar un sistema funcional de un sensor de desplazamiento mediante la técnica de ultrasonido, para determinar el valor más cercano al real a los desplazamientos del sistema de posicionamiento mecánico y hacer un estudio de la propagación de las ondas de ultrasonido en el tanque de agua, para que después, en los trabajos futuros se puedan comparar los resultados obtenidos, con los de un sensor basado en fibra óptica que actualmente se encuentra en etapa inicial de desarrollo.

## Resumen

En el presente trabajo se describen los pasos que se realizaron para la implementación de un sistema de posicionamiento mecánico, para desplazamientos de baja escala (del orden de micrómetros) mediante la generación y detección de señales de ultrasonido.

En los experimentos realizados se emplearon dos configuraciones; en la primera, en donde sólo hay un transductor que se encarga de generar y recibir el pulso de ultrasonido (modo eco); en la segunda, se tiene un transductor encargado de generar y otro para recibir el pulso de ultrasonido de manera independiente (modo transmisión).

Por otro lado, también se reporta la caracterización del campo de ultrasonido generado en un tanque de agua con transductores de inmersión, con la finalidad de determinar la localización entre el emisor y el receptor empleando una señal de ultrasonido. Además se analiza el comportamiento de la señal de ultrasonido cuando se propaga a través de dos medios de propagación en comparando cuando solo se propaga un medio homogéneo compuesto por agua.

La tesis está estructurada en cuatro capítulos de la siguiente forma: en el Capítulo I se exponen las bases teóricas de la generación y detección del ultrasonido. El Capítulo II describe el montaje experimental de las pruebas realizadas para la caracterización de la señal de ultrasonido. En el Capítulo III se analizan los resultados obtenidos y finalmente en el Capítulo IV se presentan las conclusiones del trabajo, así como las actividades que se realizarán para trabajos futuros.

# Índice

|   |             |
|---|-------------|
| <b>Agradecimiento</b> .....                   | <b>i</b>    |
| <b>Objetivo</b> .....                         | <b>ii</b>   |
| <b>Resumen</b> .....                          | <b>iii</b>  |
| <b>Índice</b> .....                           | <b>v</b>    |
| <b>Índice de figuras</b> .....                | <b>vi</b>   |
| <b>Índice de tablas</b> .....                 | <b>vii</b>  |
| <b>Introducción</b> .....                     | <b>viii</b> |
| <b>Capítulo I</b>                             |             |
| 1.1. Ultrasonido.....                         | 1           |
| 1.2. Propagación de ondas de ultrasonido..... | 1           |
| 1.2.1. Tipos de ondas.....                    | 2           |
| 1.2.1.1. Ondas longitudinales.....            | 2           |
| 1.2.1.2. Ondas transversales.....             | 3           |
| 1.2.1.3. Ondas de Rayleigh.....               | 4           |
| 1.2.1.4. Ondas de Lamb.....                   | 5           |
| 1.2.2. Velocidad del sonido.....              | 7           |
| 1.2.3. Intensidad acústica.....               | 7           |
| 1.2.4. Presión acústica.....                  | 8           |
| 1.2.5. Impedancia acústica.....               | 8           |
| 1.2.6. Reflexión.....                         | 8           |
| 1.2.7. Atenuación del ultrasonido.....        | 9           |
| 1.3. Generación de ondas de ultrasonido.....  | 11          |
| 1.3.1. Láseres ultrasónicos.....              | 12          |
| 1.3.2. Transductores magnetostrictivos.....   | 12          |
| 1.3.3. Transductores piezoeléctricos.....     | 13          |
| 1.3.3.1. Cristales naturales.....             | 14          |
| 1.3.3.2. Piezoeléctricos cerámicos.....       | 14          |
| 1.3.3.3. Polímeros piezoeléctricos.....       | 14          |
| 1.4. Detección de campos de ultrasonido.....  | 15          |
| 1.4.1. Hidrófono.....                         | 15          |
| 1.4.2. Tipos de hidrófonos.....               | 17          |
| 1.4.2.1. Hidrófonos de membrana.....          | 17          |
| 1.4.2.2. Hidrófonos de aguja.....             | 18          |
| 1.4.2.3. Hidrófonos de fibra óptica.....      | 19          |
| 1.4.3. Calibración.....                       | 20          |
| 1.5. Aplicaciones.....                        | 21          |
| 1.5.1. Aplicaciones de baja intensidad.....   | 21          |
| 1.5.2. Aplicaciones de alta intensidad.....   | 22          |
| 1.6. Conclusiones de capítulo.....            | 22          |

## Capítulo II

|   |    |
|---|----|
| 2.1. Montaje experimental.....                              | 23 |
| 2.1.1. Transductores.....                                   | 24 |
| 2.1.2. Pulsador/ Receptor.....                              | 25 |
| 2.1.3. Muestras.....  | 27 |
| 2.2. Medición del tiempo de vuelo.....                      | 28 |
| 2.3. Caracterización del desplazamiento de los motores..... | 30 |
| 2.4. Modo pulso-eco.....                                    | 33 |
| 2.4.1. Pruebas en modo pulso-eco.....                       | 34 |
| 2.5. Modo transmisión.....                                  | 36 |
| 2.5.1. Pruebas en modo transmisión.....                     | 37 |
| 2.6. Conclusiones de capítulo.....                          | 39 |

## Capítulo III

|  |    |
|--|----|
| 3.1. Resultados en modo pulso-eco.....   | 40 |
| 3.2. Resultados en modo transmisión..... | 42 |
| 3.2.1. Muestra: porta objetos.....       | 42 |
| 3.2.2. Muestra: cubre objetos.....       | 45 |
| 3.2.3. Muestra: cápsula de agua.....     | 48 |
| 3.2.4. Muestra: cápsula de acetona.....  | 51 |
| 3.2.5. Muestra: cápsula de aceite.....   | 53 |
| 3.3. Conclusiones de capítulo.....       | 56 |

## Capítulo IV

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 4. Conclusiones generales..... | 58 |
|--------------------------------|----|

|                  |    |
|------------------|----|
| Referencias..... | 60 |
|------------------|----|

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| Apéndice A. Equipo Utilizado..... | 61 |
|-----------------------------------|----|

## Índice de Figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 1.1. Espectro acústico.....   | 1  |
| Figura 1.2. Propagación de ondas longitudinales.....                         | 3  |
| Figura 1.3. Propagación de ondas Transversales.....                          | 4  |
| Figura 1.4. Propagación de ondas de Rayleigh.....                            | 5  |
| Figura 1.5. Propagación de ondas Lamb.....                                   | 6  |
| Figura 1.6. Atenuación del ultrasonido en función de la frecuencia.....      | 11 |
| Figura 1.7. Hidrófono de membrana.....                                       | 18 |
| Figura 1.8. Hidrófono de aguja.....  | 19 |
| Figura 1.9. Hidrófono basado en fibra óptica.....                            | 20 |
| Figura 2.1. Montaje experimental.....  | 23 |
| Figura 2.2. Transductor CTS Valpey Corporation.....                          | 24 |
| Figura 2.3. Pulsador/receptor modelo DPR300.....                             | 25 |
| Figura 2.4. Diagrama de bloques del pulsador/receptor.....                   | 26 |
| Figura 2.5. Diagrama del soporte de las muestras y de las cápsulas.....      | 27 |
| Figura 2.6. Diferentes criterios para medir tiempo de vuelo.....             | 29 |
| Figura 2.7. Desplazamientos del motor cada 10 pasos.....                     | 31 |
| Figura 2.8. Desplazamientos del motor cada 50 pasos.....                     | 32 |
| Figura 2.9. Desplazamientos del motor cada 400 pasos.....                    | 33 |
| Figura 2.10. Método pulso-eco.....   | 34 |
| Figura 2.11. Conexión del pulsador/receptor en modo pulso-eco.....           | 35 |
| Figura 2.12. Pruebas en modo pulso-eco.....                                  | 36 |
| Figura 2.13. Configuración en modo transmisión.....                          | 37 |
| Figura 2.14. Conexión del pulsador/receptor en modo transmisión.....         | 38 |
| Figura 2.15 Pruebas en modo transmisión.....                                 | 39 |
| Figura 3.1. Desplazamientos de 1 mm en modo pulso-eco.....                   | 40 |
| Figura 3.2. Desplazamientos modo transmisión prueba 1.....                   | 42 |
| Figura 3.3. Medio de propagación agua-porta objetos-agua.....                | 43 |
| Figura 3.4. Transductores separados 3 cm, con y sin porta objetos.....       | 44 |
| Figura 3.5. Transductores separados 6 cm, con y sin porta objetos.....       | 44 |
| Figura 3.6. Desplazamientos modo transmisión prueba 2.....                   | 45 |
| Figura 3.7. Medio de propagación agua-cubre objetos-agua.....                | 46 |
| Figura 3.8. Transductores separados 3 cm, con y sin cubre objetos.....       | 47 |
| Figura 3.9. Transductores separados 6 cm, con y sin cubre objetos.....       | 47 |
| Figura 3.10. Desplazamientos modo transmisión prueba 3.....                  | 48 |
| Figura 3.11. Medio de propagación agua-cápsula de agua-agua.....             | 49 |
| Figura 3.12. Transductores separados 3 cm, con y sin cápsula de agua.....    | 50 |
| Figura 3.13. Transductores separados 6 cm, con y sin cápsula de agua.....    | 50 |
| Figura 3.14. Desplazamientos modo transmisión prueba 4.....                  | 51 |
| Figura 3.15. Medio de propagación agua-cápsula de acetona-agua.....          | 52 |
| Figura 3.16. Transductores separados 3 cm, con y sin cápsula de acetona..... | 52 |
| Figura 3.17. Transductores separados 6 cm, con y sin cápsula de acetona..... | 53 |
| Figura 3.18. Desplazamientos modo transmisión prueba 5.....                  | 53 |
| Figura 3.19. Medio de propagación agua-cápsula de aceite-agua.....           | 54 |
| Figura 3.20. Transductores separados 3 cm, con y sin cápsula de aceite.....  | 55 |

Figura 3.21. Transductores separados 6 cm, con y sin cápsula de aceite.....55

### Índice de tablas

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1.1. Propiedades acústicas de algunos materiales.....      | 8  |
| Tabla 2.1. Dimensiones del transductor.....                      | 24 |
| Tabla 2.2. Características del pulsador/receptor.....            | 26 |
| Tabla 2.3. Características y propiedades de las muestras.....    | 28 |
| Tabla 2.4. Relación para desplazamientos cada 10 pasos.....      | 31 |
| Tabla 2.5. Relación para desplazamientos cada 50 pasos.....      | 32 |
| Tabla 2.6. Relación para desplazamientos cada 400 pasos.....     | 33 |
| Tabla 3.1. Desplazamientos en modo pulso-eco.....                | 41 |
| Tabla 3.2. Desplazamientos en modo transmisión.....              | 43 |
| Tabla 3.3. Comparación de resultados en medios heterogéneos..... | 56 |

## **Introducción**

El ultrasonido incluye la interacción materia-energía, la generación y detección de campo de ultrasonido y una variedad cada vez mayor de aplicaciones, que ahora se encuentran en casi todos los campos de la ingeniería, ciencias y en la medicina.

En las últimas décadas se ha visto una segunda revolución en el estudio del ultrasonido debido a la electrónica moderna que es utilizada en la generación y detección de campos de ultrasonido sumado, al aumento de la digitalización y procesamiento de los datos para ofrecer procesamiento en tiempo casi real, además de las capacidades avanzadas de visualización, permitiendo la creación de nuevas aplicaciones.

# CAPITULO I

En este capítulo se presentan las bases teóricas que se consideraron más relevantes para el desarrollo de esta tesis en el estudio del ultrasonido. Además, se describen los diferentes tipos de transductores para la generación de ondas ultrasónicas y dispositivos que nos permiten medir los campos acústicos, con una breve explicación de algunos parámetros de este tipo de ondas, tales como son: la presión acústica, intensidad acústica, impedancia acústica y velocidad de propagación de las ondas. Finalmente, se incluyen algunos de los fenómenos que se presentan en la interacción del ultrasonido con el medio en que se propaga.

## 1.1 Ultrasonido

El ultrasonido se define como una serie de ondas mecánicas, generalmente longitudinales, originadas por la vibración de un cuerpo elástico y que se pueden propagar por un medio cuya frecuencia supera la del sonido audible por el humano [1].

Al igual que el espectro visible, el espectro audible corresponde a la función de respuesta del humano estándar y cubre las frecuencias de 20 a 20 kHz [2], ver Figura 1.1.

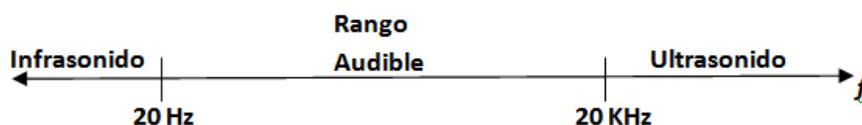


Figura 1.1. Espectro acústico.

## 1.2 Propagación de ondas de ultrasonido

Las ondas ultrasónicas están dentro de la categoría de las ondas elásticas en las cuales la perturbación se propaga con una velocidad que depende de las propiedades elásticas del medio material donde tiene lugar dicha propagación. Es importante señalar que tanto el agente emisor, como el medio de propagación del ultrasonido deben ser materiales, ya que el ultrasonido no puede propagarse

en el vacío. La propagación en gases y líquidos se realiza por medio de ondas longitudinales, mientras que en los sólidos se propagan ondas longitudinales y transversales [3].

La propagación de ondas ultrasónicas a través de un medio, o de un medio a otro diferente, está supeditada a las características de los mismos y muy especialmente a su impedancia acústica, dando origen a los fenómenos de reflexión, refracción, difracción, dispersión e interferencias, así como también a los de absorción, como parte integrante de la atenuación del ultrasonido. La propagación tiene lugar, prácticamente, en medios finitos que poseen superficies límites o de contacto con otros medios, precisamente, de distinta impedancia, medios que pueden ser sólidos o fluidos.

### **1.2.1 Tipos de Ondas**

Hay dos principales clases de ondas, longitudinales y transversales en donde las partículas desplazadas siguen una trayectoria paralela o perpendicular a la dirección de propagación de la onda. Estas ondas son frecuentemente llamadas ondas de compresión y de corte respectivamente. Además de estos dos tipos de onda, las ondas de Rayleigh se propagan en la frontera entre un líquido y un sólido, mientras que las ondas de Lamb se presentan si las dimensiones del medio son comparables con la longitud de onda [4].

A continuación se hace una descripción más detallada de la forma en que se propagan estas ondas.

#### **1.2.1.1 Ondas longitudinales**

En este tipo de onda, las partículas oscilan en la misma dirección que el sentido de propagación de la onda. Las fluctuaciones de las partículas respecto a su posición de equilibrio, hacen que existan zonas de compresión (partículas muy juntas) y zonas de rarefacción (partículas muy separadas), ver Figura 1.2; es por esto, que también a las ondas longitudinales, se les conoce como ondas de presión u ondas de densidad.

Estas zonas de compresión y depresión se desplazan a través del medio a una velocidad constante y propia de este medio. El modo de vibración longitudinal se produce en sólidos, en líquidos y gases [5].

La ecuación de onda longitudinal sin pérdidas en la dirección del eje  $x$  es:

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = \frac{Y}{\rho} \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = c^2 \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2}, \quad (1.1)$$

Donde  $c$  es la velocidad del ultrasonido en el medio,  $Y$  es el módulo de Young,  $\xi$  es el desplazamiento en metros y  $\rho$  es la densidad del medio [6].

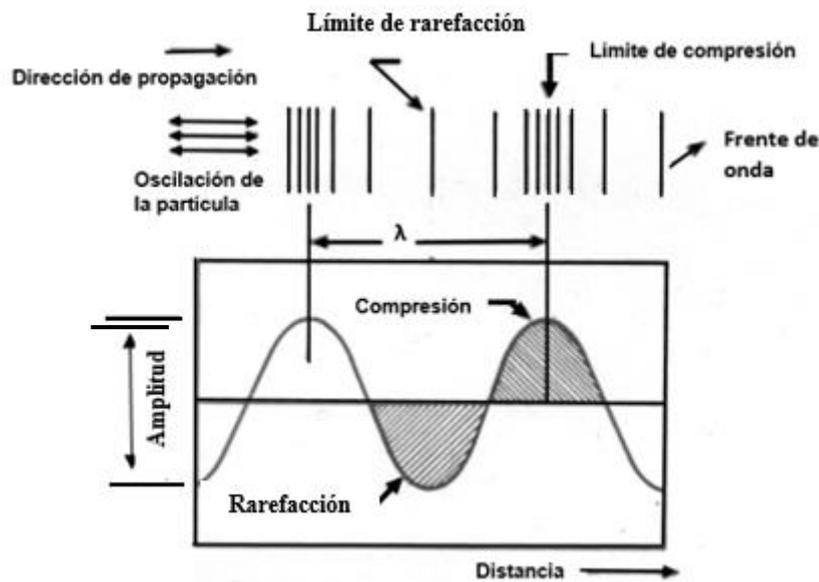


Figura 1.2. Propagación de ondas longitudinales.

### 1.2.1.2 Ondas transversales

En este tipo de onda, la vibración de las partículas es perpendicular al sentido de propagación se produce esta vibración al aplicar una fuerza cortante y periódica en el borde de un material sólido. Esta fuerza constante se transmite a las partículas de los planos adyacentes, dando lugar a oscilaciones transversales retardadas, según su distancia al plano de excitación, ver Figura 1.3.

Los gases y los líquidos por su condición de fluidos, no pueden transmitir este tipo de onda, ya que carecen de enlaces elásticos transversales [5].

La forma de la ecuación de onda transversal que se propaga en el eje  $x$  es:

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = \frac{T}{\rho} \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2}, \quad (1.2)$$

Donde  $\xi$  es la posición transversal relativa al equilibrio,  $T$  es la tensión y  $\rho$  es la densidad del medio [6].

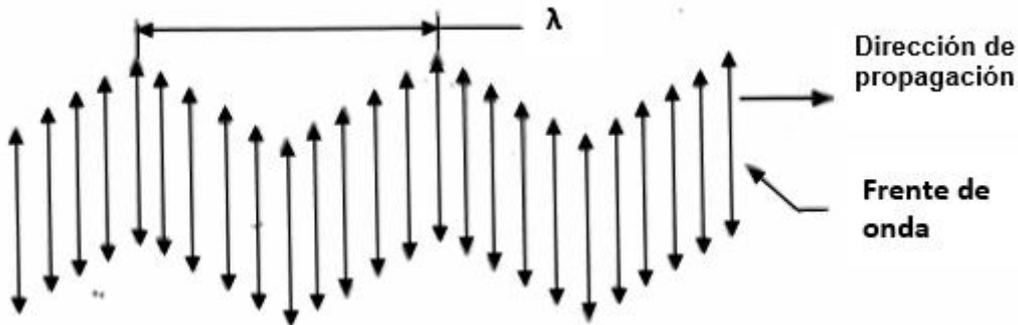


Figura 1.3. Propagación de ondas transversales.

### 1.2.1.3 Ondas de Rayleigh

Son un caso particular de onda transversal. Se propagan por la superficie plana o curva de un sólido siguiendo su contorno, salvo que lleguen a una arista viva (afilada), o una zona curva con un radio inferior a una longitud de onda, en cuyo caso la onda se refleja. Lo mismo ocurre si en el recorrido encuentra una gota de aceite o suciedad, que hacen que la onda se interrumpa, dando lugar a señales que se podrían interpretar como defectos.

La vibración de las partículas es en forma de elipse, con una rotación en sentido contrario a las agujas del reloj ver Figura 1.4. Debajo de la superficie, las partículas vuelven a estar de nuevo en su posición de descanso, esto nos dice que la onda de superficie tiene algo de penetración; esta profundidad de penetración es del orden de una longitud de onda [5].

La ecuación de la propagación de las ondas de Rayleigh se escribe:

$$\eta^6 - 8\eta^4 + 8(3 - 2\nu^2)\eta^2 - 16(1 - \nu^2) = 0, \quad (1.3)$$

Donde:

$$\eta = \frac{c_r}{c_s}, \quad (1.4)$$

$$\nu = \frac{c_s}{c_L}, \quad (1.5)$$

$c_r$  es la velocidad de Rayleigh, mientras que  $c_L$  y  $c_s$  son las velocidades de las ondas longitudinales y transversales respectivamente [6].

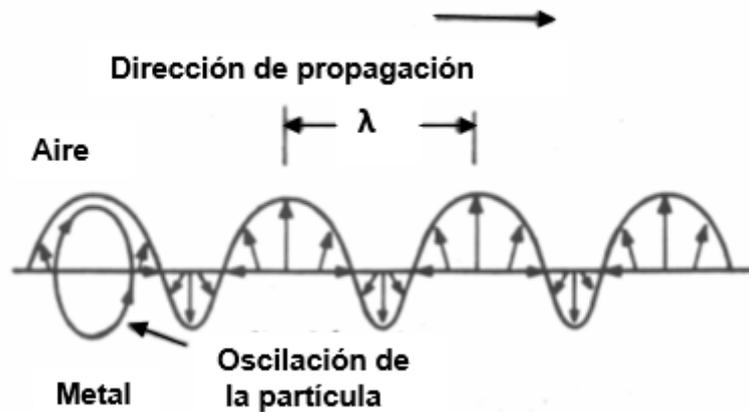


Figura 1.4. Propagación de ondas de Rayleigh.

La velocidad de propagación es independiente de la frecuencia y ligeramente menor que la velocidad de la onda transversal (0.9 del valor). La tracción hace aumentar la velocidad, mientras que la compresión, la disminuye [5].

#### 1.2.1.4 Ondas de Lamb

Si el espesor del sólido en el que inducimos ondas de superficie, se reduce en espesor, obtenemos una superficie delgada y lisa, donde la onda de superficie, ya no puede existir como tal. Cuando este espesor es del mismo orden que la longitud de onda, se producen las ondas de Lamb. Se conocen dos modos básicos: Onda simétrica o de dilatación y onda asimétrica o de flexión, ver Figura 1.5.

En el caso de la onda simétrica, las partículas de la zona media o fibra neutra vibran con oscilaciones longitudinales; mientras que en la onda asimétrica con oscilaciones transversales, el resto de las partículas oscilan en ambos tipos de onda elípticamente [5].

Las ecuaciones de propagación de las ondas Lamb son:

a) Ondas simétricas

$$\psi_1 = B \sinh \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{1 - \frac{c_p^2}{c_s^2}} x e^{j(\omega t - 2\pi z / \lambda)}, \quad (1.6)$$

$$\phi_2 = A \sinh \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{1 - \frac{c_p^2}{c_L^2}} x e^{j(\omega t - 2\pi z / \lambda)}, \quad (1.7)$$

b) Ondas Asimétricas

$$\psi_2 = B \cosh \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{1 - \frac{c_p^2}{c_L^2}} x e^{j(\omega t - 2\pi z / \lambda)}, \quad (1.8)$$

Donde  $c_L$  es la velocidad de la onda longitudinal en el material de la placa,  $c_s$  es la velocidad de la onda transversal, y  $c_p$  es la velocidad de fase [6].

La velocidad de este tipo de onda no se considera como constante del material, ya que depende del espesor del material, del modo de onda y de la frecuencia [5].

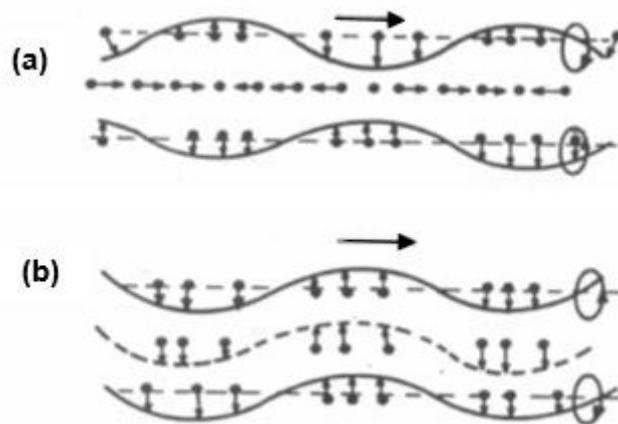


Figura 1.5. a) Onda Lamb simétrica b) Onda Lamb asimétrica.

### 1.2.2 Velocidad del ultrasonido

La velocidad de propagación depende del tipo de onda, las propiedades elásticas del medio, la densidad del medio, y en algunos casos, la frecuencia y la amplitud [6]. Un medio altamente compresible, como el aire por ejemplo, tiene una baja velocidad del ultrasonido, mientras que un medio menos compresible, como es el hueso humano, tiene una mayor velocidad de sonido. Dicho de otra forma, un medio menos denso tiene una mayor velocidad de ultrasonido que un medio más denso.

La velocidad de la onda longitudinal  $c$  está determinada por la relación del módulo de elasticidad  $E$  (una medida de la rigidez de un medio y su resistencia a ser comprimido), y la densidad  $\rho$  del medio. [7].

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (1.9)$$

### 1.2.3 Intensidad acústica

Se define como la cantidad de energía que pasa por unidad de área, por la unidad de tiempo. Se obtiene mediante el producto de la “Energía específica” (energía presente en la unidad de volumen, que avanza con la velocidad acústica), por la velocidad de propagación de la onda acústica.

Se debe tener muy en cuenta la relación entre la energía específica o intensidad acústica, con la presión acústica; pues la amplitud de la indicación de un eco en la pantalla del osciloscopio en el método de pulso-eco, es proporcional a la presión acústica.

$$I = \frac{1P^2}{2Z}, \quad (1.10)$$

Expresión que nos indica la relación entre el cuadrado de la presión acústica  $P$ , la intensidad acústica  $I$  y la impedancia acústica  $Z$ .

### 1.2.4 Presión acústica

En la inspección ultrasónica por el método de impulso-eco, la amplitud de los ecos es proporcional a la presión acústica.

Para las ondas longitudinales, la presión acústica como fuerza por unidad de superficie, es normal a la superficie de la onda.

Para las ondas transversales, la presión acústica es una fuerza cortante por unidad de superficie, paralela a la superficie de la onda.

### 1.2.5 Impedancia acústica

Las cantidades de energía reflejada y transmitida dependen de las impedancias acústicas de los dos materiales. La impedancia acústica  $Z$  de un material es definida como el producto de la densidad  $\rho$  del material y la velocidad del sonido  $v$  en el material [8].

$$Z = v\rho, \quad (1.11)$$

| Material            | velocidad del ultrasonido [m/s] | impedancia característica [kg·m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> x10 <sup>6</sup> ] | densidad [kg/m <sup>3</sup> ] |
|---------------------|---------------------------------|--|-------------------------------|
| Aceite de oliva     | 1445                            | 1.32   | 918                           |
| Acetona             | 1174                            | 1.07   | 791                           |
| Agua (20°C)         | 1480                            | 1.483  | 1000                          |
| Agua de mar (25°C)  | 1531                            | 1.569  | 1025                          |
| Aluminio            | 6420                            | 17.33  | 2700                          |
| Cobre laminado      | 5010                            | 44.6   | 8930                          |
| Plomo               | 2200                            | 24.6   | 11200                         |
| PZT-murata          | 4.72                            | 37.5   | 7950                          |
| PVDF                | 2300                            | 4.2  | 1790                          |
| Vidrio-Corning 0215 | 5660                            | 14.09  | 2490                          |
| Vidrio sodocálcico  | 6000                            | 13.4   | 2240                          |

Tabla 1.1. Propiedades acústicas de algunos materiales [9].

### 1.2.6 Reflexión

El coeficiente de reflexión describe la fracción de la intensidad del sonido incidente en una interfaz que se refleja. Para la incidencia perpendicular, el

coeficiente de reflexión de la amplitud de la presión,  $R_p$ , se define como la relación de la presión reflejada  $P_r$  entre la presión incidente  $P_i$ , como:

$$R_p = \frac{P_r}{P_i} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}, \quad (1.12)$$

En donde  $Z_1$  y  $Z_2$  son las impedancias acústicas de dos materiales.

La fracción de energía de sonido que es reflejada en la superficie entre dos materiales depende del ángulo de incidencia. Cuando el haz incide en la superficie en o casi ángulos rectos, la fracción de energía del sonido que se refleja en la interfaces entre dos materiales de impedancias acústicas  $Z_1$  y  $Z_2$ , es definido como el coeficiente de reflexión de la intensidad  $R_i$ , expresado como la relación de la intensidad reflejada  $I_r$  entre la intensidad incidente  $I_i$  como:

$$R_i = \frac{I_r}{I_i} = \left( \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2, \quad (1.13)$$

El coeficiente de transmisión  $T$  puede ser calculado:

$$T = \frac{2Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (1.14)$$

En el caso del ultrasonido, la máxima transmisión de una onda ultrasónica de un medio a otro ocurre cuando las impedancias características son iguales.

### 1.2.7 Atenuación del ultrasonido

La atenuación se refiere a la disminución de la intensidad de un frente de onda a medida que avanza a través de un medio. Cuando viaja a través de un material, el sonido es atenuado exponencialmente con la profundidad del viaje por las siguientes razones [8].

- La energía es absorbida y puede ser convertida en calor, si es aplicada una señal con alta intensidad.

- La energía sale del haz, debido a la dispersión. Además puede reflejarse parcialmente por las diferentes interfaces en donde se propaga el haz. Cuanto mayor es la frecuencia, mayor es la atenuación.

El total de efectos es tal que una onda plana de amplitud inicial  $A(0)$ , después de viajar una distancia  $x$ , tendrá una amplitud  $A(x)$  dada por [4]:

$$A(x) = A(0)\exp(-\mu x), \quad (1.15)$$

Este efecto es expresado como un coeficiente de atenuación  $\mu$ , donde:

$$\mu = \frac{1}{x} \ln\left(\frac{A(0)}{A(x)}\right), \quad (1.16)$$

La unidad del coeficiente de atenuación  $\mu$  es el neper por metro. Para expresarlo en decibeles por metro, el coeficiente de atenuación se denota con la letra  $\alpha$ , donde:

$$\alpha = 20(\log_{10} e)\mu = 8.686 \mu, \quad (1.17)$$

En la Figura 1.6 se observa que el efecto de la atenuación, la intensidad del ultrasonido decrece exponencialmente con la profundidad de penetración. Por otra parte la atenuación se incrementa con el aumento de la frecuencia. Cada curva muestra la intensidad de los ultrasonidos con una frecuencia particular, como una función de la profundidad de penetración en el medio cuyo coeficiente de atenuación es (0.5 dB/cm)/ MHz. Teniendo en cuenta que la distancia total recorrida por el impulso de ultrasonido y de eco es el doble de la profundidad de penetración [7].

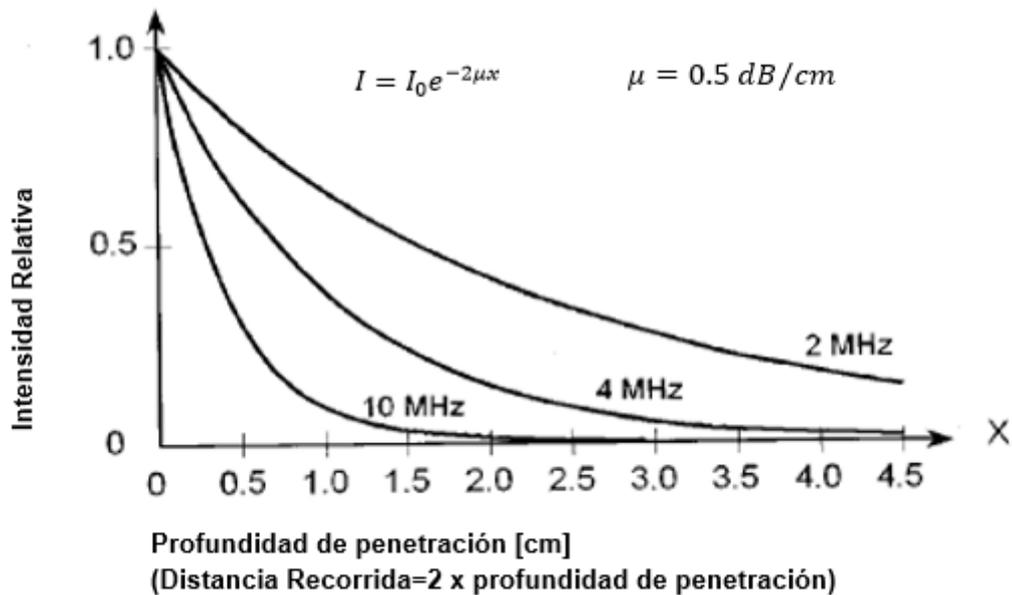


Figura 1.6. Atenuación del ultrasonido en función de la frecuencia.

### 1.3 Generación de ondas de ultrasonido

La energía de ultrasonido es generada y detectada por dispositivos llamados transductores. Por definición, un transductor es un “dispositivo que es accionado por la energía de un sistema para suministrar energía en cualquier otra forma a un segundo sistema”, es decir, un transductor convierte energía de una forma a otra. En ultrasonido, la más típica conversión de energía, es de eléctrica a energía mecánica (transmisor) o de energía mecánica a energía eléctrica (receptor) [6].

La función de un transductor electro-acústico es irradiar sonido en un medio o para detectar vibración acústica que fue radiada en el medio. Las respuestas de los transductores son medidas por la capacidad de un transductor para realizar estas funciones. Los transductores generalmente irradian ultrasonido de una manera direccional, que cambia con la frecuencia y con la distancia del transductor. A una frecuencia dada el campo lejano es la región más allá del cual las características direccionales se convierten en independientes de la distancia, y la presión del ultrasonido se hace inversamente proporcional a la distancia [10]. Hay varios métodos diferentes para excitar ondas de ultrasonido, incluyendo piezoelectricidad, electrostricción, magnetostricción, electromagnetismo, generación por láser, etc. [2]. Sin embargo, las dos tecnologías más utilizadas

para generar ondas ultrasónicas son las basadas en dispositivos piezoeléctricos y magnetostrictivos [6].

### **1.3.1 Láseres ultrasónicos**

El uso de láseres se ha establecido, para algunas aplicaciones, como una alternativa sin contacto para la transducción piezoeléctrica, que incluye tanto la generación y detección de ultrasonido.

Un láser tiene la capacidad de entregar energía de luz concentrada y pulsada sobre una superficie, que puede ser absorbida y convertida en un campo de ondas ultrasónicas. A medida que se incrementa la potencia del láser, hay dos mecanismos de interacción para un material con láser, que generan las ondas ultrasónicas. En un régimen de baja potencia hay un mecanismo de generación de ultrasonidos termo-elástica. Aquí es donde un haz de un láser pulsado incide sobre una superficie, es absorbido y causa una rápida expansión térmica local. Es esta expansión que a su vez genera un "pulso" de desplazamiento que se mueve como la propagación de las ondas ultrasónicas en el material. Tal campo de ondas de ultrasonido, en general, consiste de una combinación de ondas transversales, longitudinales y de Rayleigh. En alta potencia, existe un régimen de ablación donde se vaporiza, ya sea un material de superficie o un revestimiento, causando una fuerza de reacción neta del material de ablación y de las interacciones de plasma de la superficie. En la detección, cuando las ondas ultrasónicas interactúan con una superficie libre causan desplazamientos de la superficie, estos pequeños movimientos pueden ser detectados utilizando interferómetros basados en láser [6].

El pulso corto de un láser tiende a producir ondas de alta frecuencia ultrasónica (50 MHz y más altas) y mecanismos de ablación que no son verdaderamente destructivos, ya que dejan pequeños hoyos en la superficie de una pieza.

### **1.3.2 Transductor magnetostrictivos**

La magnetostricción es un término aplicado a la variación de dimensiones de un material magnético cuando el campo magnético ejercido es variado en amplitud.

Este fenómeno fue descubierto por Joule y fue descrito por él en un artículo publicado en 1847 [6].

Los primeros transductores ultrasónicos de alta potencia que operaban en un rango de frecuencias bajas (debajo de 100 KHz) fueron hechos de materiales magnetostrictivos.

Varios materiales exhiben propiedades magnetostrictivas. Níquel, Hierro-Níquel, y aleaciones Hierro-Cobalto (permendur) se utilizan con mayor frecuencia para transductores [6].

### **1.3.3 Transductores piezoeléctricos**

La piezoelectricidad ocurre cuando se aplica una tensión mecánica a un cristal, se produce una tensión eléctrica y también una diferencia de potencial entre las caras opuestas del cristal. Esto se conoce como el efecto piezoeléctrico directo. Por el contrario, el efecto inverso corresponde a la aplicación de una diferencia de potencial, que induce una tensión mecánica en el cristal [2].

Los transductores piezoeléctricos son usados en la mayoría de las frecuencias de ultrasonido para generar y detectar energía de ultrasonido en varios niveles de intensidad. Estos transductores utilizan componentes piezoeléctricos, como son las placas u otras configuraciones adecuadas, que generan cargas en las superficies, bajo la influencia de tensiones o en el cambio de dimensiones cuando se someten a un campo eléctrico [6].

Muchos de los progresos realizados en ultrasonido se deben a la sinergia que ofrecen los nuevos materiales de alto rendimiento y la mejora electrónica. Un gran paso se dio en la década de 1940 con el desarrollo de transductores cerámicos polarizados de la familia titanato-zirconato de plomo (PZT), que eran relativamente baratos, robustos y de alto rendimiento, y se adaptan perfectamente al trabajo de campo. El desarrollo de polivinilideno (PVDF) y copolímeros fueron importantes en muchas aplicaciones, particularmente en ultrasonido médico, al contar con una impedancia acústica que se adapta muy bien a la del agua. Otras propiedades favorables incluyen flexibilidad y gran ancho de banda. Sin embargo, son altamente atenuantes, por lo que no son adecuados para aplicaciones de alta frecuencia [2].

### **1.3.3.1 Cristales naturales**

Hay una importante fuente de materiales piezoeléctricos. El grupo incluye cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ), tantalato de litio ( $\text{LiTaO}_3$ ) y niobato de litio ( $\text{LiNbO}_3$ ). Estos materiales tienden a exhibir resonancias agudas debido a su alta impedancia acústica. El comportamiento resonante hace ideales a estos materiales para aplicaciones que requieren mediciones precisas en varias frecuencias individuales. Sin embargo, estos efectos de resonancia reducen la utilidad de los materiales.

### **1.3.3.2 Piezoeléctricos cerámicos**

Estos consisten de materiales cerámicos sintéticos tales como titanato de bario ( $\text{BaTiO}_3$ ) y el comúnmente utilizado PZT. Estos materiales no son naturalmente piezoeléctricos, su naturaleza piezoeléctrica es inducida por polarización durante su fabricación. Se utilizan en gran medida en los transductores de ultrasonido médico, ya que se pueden hacer en una variedad de formas diferentes, con diferentes orientaciones de polarización. La principal desventaja mostrada por este grupo es que tiene una impedancia acústica aproximadamente 25 veces mayor que la de los tejidos humanos y el agua. Esto introduce la necesidad de búsqueda de capas entre el transductor y el objeto para reducir las pérdidas y mejorar el ancho de banda [11].

### **1.3.3.3 Polímeros piezoeléctricos**

Al igual que los piezoeléctricos cerámicos, estos materiales no son piezoeléctricos naturales y también son polarizados durante su fabricación. Tal vez, el más utilizado es el fluoruro de polivinilideno (PVDF) y también sus copolímeros con trifluoroetileno P(VDF-TrFE). Los PVDF son generalmente utilizados para la detección de ultrasonido en lugar de su generación. Los PVDF se pueden fabricar en láminas delgadas, lo que es adecuado para aplicaciones tales como el hidrófono de membrana. Otra ventaja clave de estos materiales es que su impedancia acústica es cercana a la de los tejidos humanos. Sin embargo, los polímeros piezoeléctricos tienen un coeficiente de transmisión

relativamente bajo, por lo que no son adecuados para generar campos de alta potencia.

#### **1.4 Detección del campo de ultrasonido**

Además de la generación de ultrasonido, el efecto piezoeléctrico ofrece un útil mecanismo para la detección de ultrasonido. Los transductores de ultrasonido pueden ser empleados para enviar y recibir pulsos de ultrasonido. Sin embargo, para la caracterización de transductores, generalmente se requiere un detector separado [12]. Para las mediciones basadas en un tanque de agua se utiliza un dispositivo llamado hidrófono.

##### **1.4.1 Hidrófono**

El término hidrófono se emplea para referirse a cualquier transductor subacuático destinado exclusivamente para recibir señales acústicas. La medición de magnitudes acústicas en lugares específicos dentro de un campo requiere el uso de un hidrófono. [12].

Un hidrófono ideal deberá tener las siguientes características:

##### **a) Funcionamiento estable**

Un funcionamiento estable sobre una gran escala de tiempos es deseable para minimizar la necesidad de re-calibración, ya que si se requiere una calibración por un organismo nacional de normalización, éste puede resultar costoso y consumir mucho tiempo.

##### **b) Pequeño radio efectivo**

Para evitar realizar un promediado espacial del campo acústico, es necesario tener un sensor cuyo radio efectivo sea significativamente menor a la longitud de onda acústica. El radio efectivo de un hidrófono se encuentra, no a partir de las dimensiones geométricas del elemento activo en sí, sino más bien de la

respuesta direccional del hidrófono, para propagación en agua, el cual varía de 1.5 a 0.1 mm en un rango de frecuencias de 1 a 15 MHz [4].

De acuerdo a IEC 61102 (International Electrotechnical Commission), para minimizar los errores debidos al promediado espacial, el tamaño máximo del elemento efectivo adecuado para la caracterización de un campo de ultrasonido específico puede ser determinado por:

$$a_{max} = \frac{\lambda}{8a_1} (l^2 + a_1)^{\frac{1}{2}}, \quad (1.18)$$

Donde  $a_{max}$  es el radio máximo efectivo del elemento activo del hidrófono,  $\lambda$  es la longitud de onda acústica,  $l$  es la distancia entre el transductor y el hidrófono y  $a_1$  es el radio efectivo del transductor. Entonces en 20 MHz, para una distancia entre el transductor y el hidrófono de 10 cm, con un radio del transductor de 2.5 cm, el hidrófono deberá tener un radio efectivo de aproximadamente 38  $\mu\text{m}$  para reunir los requerimientos de la norma de medición [11].

### **c) Sensibilidad de banda ancha**

El dispositivo deberá ser suficientemente sensible para producir un nivel de señal razonable. Los dispositivos no son absolutos y su sensibilidad, expresada en volts por pascal, deberá ser determinada por la calibración en un campo conocido [4]. El equipo moderno de ultrasonido médico opera con frecuencias centrales de hasta 20 MHz, si se tienen en cuenta los efectos de propagación no lineales, es decir generación de armónicos, entonces cualquier hidrófono debe ser capaz de medir señales con frecuencias contenidas en 60 MHz y superiores. Además los niveles de sensibilidad requerida dependerán de la aplicación.

### **d) Respuesta de frecuencias plana**

Además de tener una respuesta de banda ancha, idealmente, la sensibilidad del hidrófono no debe variar con la frecuencia. Esto es importante, ya que permite la reproducción precisa de las características (temporal y de amplitud) de los campos de ultrasonido, asumiendo que la respuesta de fase es también conocida.

Sin embargo, un hidrófono real debe tener una respuesta en frecuencia estable en un ancho de banda superior a 20 MHz dependiendo de la aplicación.

### **e) Respuesta lineal**

Es importante que la señal de los hidrófonos se relacione linealmente con la presión acústica que se está midiendo. El grado de linealidad requerida dependerá del tipo de transductor caracterizado. En el campo del diagnóstico médico, tienden a tener picos de presiones negativas de hasta 6 MPa. Sin embargo, algunos campos de diagnóstico médico tendrán picos de presiones positivas más altos. Por lo tanto, para la caracterización de los campos de diagnóstico médico, el sensor debe ser lineal sobre un rango de por lo menos  $\pm 10$  MPa [11].

### **1.4.2 Tipos de hidrófonos**

Los hidrófonos ultrasónicos pueden tomar muchas formas, por ejemplo: aguja, de membrana e hidrófonos de fibra óptica, a continuación se describen algunos de ellos [12].

#### **1.4.2.1 Hidrófonos de membrana**

Los hidrófonos de membrana constan de una lámina delgada de película de PVDF no polarizada, estirada sobre un anillo (diámetro interno de 100 mm) con electrodos de oro/cromo depositadas al vacío sobre las superficies, ver Figura 1.7. Estos electrodos sólo se solapan en una pequeña zona central, que se polariza para formar el elemento activo del dispositivo. El diámetro del elemento activo es por lo general de 1.0 ó de 0.5 mm. Existe también una versión de doble lámina blindada que utiliza dos capas de PVDF, con el elemento activo y casi todo el electrodo activo intercalado entre dos planos de tierra [4].

Los hidrófonos de membrana tienen la ventaja de causar una perturbación mínima en el campo acústico, en la mayoría de los casos desde que el haz ultrasónico pasa a través de la abertura del anillo. Además, los hidrófonos de

membrana exhiben una fuerte direccionalidad, y esto hace que la alineación sea un factor crucial en las mediciones, especialmente a frecuencias altas.

Los hidrófonos de membrana son excelentes para la caracterización de los pulsos cortos de banda ancha, que son producidos por los sistemas de formación de imágenes ultrasónicas. Sin embargo, estos hidrófonos son menos adecuados para la medición de señales de onda continua debido a la posibilidad de flexión de modos de ondas estacionarias producidas en la membrana [12].



Figura 1.7. Hidrófono de membrana.

#### 1.4.2.2 Hidrófonos de aguja

Los hidrófonos de aguja son buenos dispositivos de medición y se construyen a partir de un pequeño disco de un material piezoeléctrico montado en el extremo de un conductor coaxial. El polímero piezoeléctrico de fluoruro de polivinilideno (PVDF) se ha utilizado como un material alternativo para el elemento activo de hidrófonos. En el diseño de la sonda de aguja, el elemento activo es apoyado en el extremo de una aguja, hecha de un tubo metálico de pared delgada de aproximadamente 1 mm de diámetro. La ventaja de las sondas de PVDF sobre diseños cerámicos, es que la impedancia acústica del PVDF es de naturaleza muy similar a la del agua (dando resonancias menos pronunciadas), la experiencia ha demostrado que estos dispositivos son más estables que los cerámicos. Sin embargo, se han reportado cambios en la sensibilidad de hasta 30 %, debido a las conexiones eléctricas [4].

Aunque los diseños y la construcción de sondas de aguja PVDF han superado parcialmente los problemas de resonancia y reverberación que acosan a los hidrófonos cerámicos, todavía tienen problemas con las rápidas fluctuaciones de

la sensibilidad, que ocurren en frecuencias entre 1 y 4 MHz, además hay una rápida caída en la sensibilidad por debajo de 1 MHz, debido a la difracción de la ecografía alrededor de la punta de la sonda [4]. Los hidrófonos de aguja tienen una mayor sensibilidad y menor costo que un hidrófono de membrana de tamaño comparable [12], en la Figura 1.8 se muestran algunos hidrófonos de aguja.



Figura 1.8. Hidrófono de aguja.

#### 1.4.2.3 Hidrófonos de fibra óptica

El hidrófono basado en fibra óptica es la tecnología más actual en desarrollo de hidrófonos, ver Figura 1.9. Algunos sensores de fibra óptica se basan en la medición del cambio de índice de refracción del agua debido a la presión ultrasónica [12].

En contraste con cualquier hidrófono de membrana o aguja, los dispositivos de fibra óptica se basan únicamente en un método de transducción óptica y por lo tanto son inmunes a la interferencia electromagnética [12].

Existen dos principales tipos de hidrófonos de fibra óptica. En el primer tipo, la onda de presión ultrasónica modula el índice de refracción del fluido delante de la punta de la fibra, lo que lleva a un cambio en la reflectividad que se puede medir con un sistema de detección óptico en el otro extremo de la fibra. Un problema con este tipo de hidrófono es su falta de sensibilidad. El segundo tipo de hidrófono de fibra óptica tiene una punta recubierta de metal y funciona como un interferómetro heterodino. En una variante de esta configuración, se tiene un dispositivo robusto, capaz de soportar ondas de choque, que se compone de una fibra cortada con una o más capas ópticas y dieléctricas formadas por

pulverización catódica. Por ejemplo, una fibra mono modo con un núcleo con un diámetro de  $3.5 \mu\text{m}$  con una capa de  $\lambda/4$  en la punta y un ancho de banda de 70 MHz [13].



Figura 1.9. Hidrófono basado en fibra óptica.

Después del estudio anterior, surge la pregunta del procedimiento de elección del mejor y más conveniente hidrófono, lo que nos lleva a lo siguiente:

Al elegir un hidrófono para una medición en particular, varios factores deben ser tomados en cuenta. El costo del dispositivo y el tamaño de las disponibilidades presupuestales son, quizás, las consideraciones obvias. Otros factores dependen de las propiedades de rendimiento de los hidrófonos y el tipo particular de medición a realizar [4].

### 1.4.3 Calibración

Antes de ser utilizado para hacer las mediciones, un hidrófono deberá ser calibrado. Sin una calibración, no es posible determinar muchos de los parámetros acústicos que necesitan ser medidos cuando se caracteriza la salida de equipo médico ultrasónico.

La mayoría de los proveedores de hidrófonos proporcionan calibraciones con sus dispositivos. Por ejemplo, todos los hidrófonos de membrana proporcionados por GEC Marconi [4] se calibran por comparación con un hidrófono de referencia, que ha sido previamente calibrado.

Aunque un hidrófono pudo haber sido calibrado en el momento de la compra, su sensibilidad puede cambiar con el tiempo y el uso. Sin embargo sigue existiendo la necesidad de garantizar que la sensibilidad de un hidrófono de trabajo no ha

cambiado y esto se puede hacer mediante el establecimiento de un régimen de calidad. Un procedimiento simple que puede ser adoptado es la de mantener un hidrófono de referencia interno que no se utiliza para las mediciones de rutina.

## **1.5 Aplicaciones**

Una manera de dividir el ultrasonido en categorías puede ser el considerar las aplicaciones en términos de baja intensidad y alta intensidad. Las aplicaciones de baja intensidad son aquellas en las que el objetivo principal es transmitir energía a través de un medio. El objetivo principal puede ser obtener información del medio o para pasar información a través de medios de comunicación, pero esto ha de lograrse sin causar un cambio en el estado del medio en el que se propaga.

Las aplicaciones de alta intensidad son aquellas en las que el propósito es producir un efecto en el medio, o de su contenido, a través del cual se propaga la onda. En muchos casos, las interacciones son no lineales y pueden involucrar fuerzas térmicas, mecánicas, cortes y fenómenos de cavitación [6].

### **1.5.1 Aplicaciones de baja intensidad**

Hay numerosas aplicaciones de baja intensidad de energía de ultrasonido, algunas de las cuales incluyen control de procesos, ensayos no destructivos (Non-Destructive Testing, NDT por sus siglas en inglés), detección de intrusos, medición de propiedades elásticas, diagnóstico médico, líneas de retardo y procesamiento de señales [6].

Los dispositivos ultrasónicos que utilizan los principios de baja intensidad también incluyen algunos detectores de altura, medidores de nivel de líquido, detectores de roturas de banda de papel en molinos y sensores de caracterización de sistemas de materiales de dos fases. También se utilizan en la detección, donde las emisiones acústicas de crecimiento de grietas en los metales, de la cavitación inducida en bombas de proceso, las emisiones de la nucleación de burbujas en líquidos sobrecalentados inducidos por las interacciones entre partículas [6].

### **1.5.2 Aplicaciones de alta intensidad**

Las principales aplicaciones comerciales de alta intensidad son la limpieza, soldaduras de plásticos, mecanizado y soldadura, finalmente existe un creciente interés en el despliegue de la ecografía sonoquímica.

La limpieza ultrasónica proporciona uno de los mayores mercados de equipos de ultrasonido de alta intensidad. También hay un amplio uso de ultrasonidos para la emulsificación y preparación de la muestra. Los sistemas de onda estacionaria se están desarrollando para la clasificación de partículas y células, así como la concentración en las corrientes de fluido [6].

### **1.6 Conclusiones de capítulo**

La manera más común para la generación de ultrasonido es mediante transductores piezoeléctricos, al permitirnos trabajar en un amplio rango de frecuencias e intensidades para aplicaciones médicas o para la caracterización de materiales. Además los transductores basados en polímeros, como los PVDF, son una buena opción para utilizarlos como detectores de campo acústico al tener una impedancia acústica similar a la del agua, razón por la cual los hidrófonos son fabricados con estos materiales.

Dependiendo de algunas propiedades de los materiales como son la velocidad de propagación del ultrasonido, impedancia acústica, etc. se pueden presentar diferentes tipos de ondas (longitudinales, transversales, Rayleigh y Lamb) que al propagarse por medios con diferentes características se puede ver afectado por reflexiones y atenuaciones de la señal recibida.

## CAPÍTULO II

En este capítulo se explica el montaje experimental empleado para la medición del campo acústico, para tal fin se describen las características del sistema en dos configuraciones (modo pulso-eco y modo transmisión), lo que permitirá generar y recibir el pulso de ultrasonido empleando transductores piezoeléctricos, las propiedades de los diferentes medios en los que se hizo incidir la onda y los dispositivos para la adquisición de los datos. También se describe la técnica con la que se caracterizó el desplazamiento de los motores, basada en la obtención del tiempo de vuelo de la señal de ultrasonido, y con ella determinar la distancia a la que se encuentra el transductor-transmisor y el transductor-receptor (modo transmisión) o la distancia que hay entre el transductor y la muestra (modo pulso-eco).

### 2.1 Montaje experimental

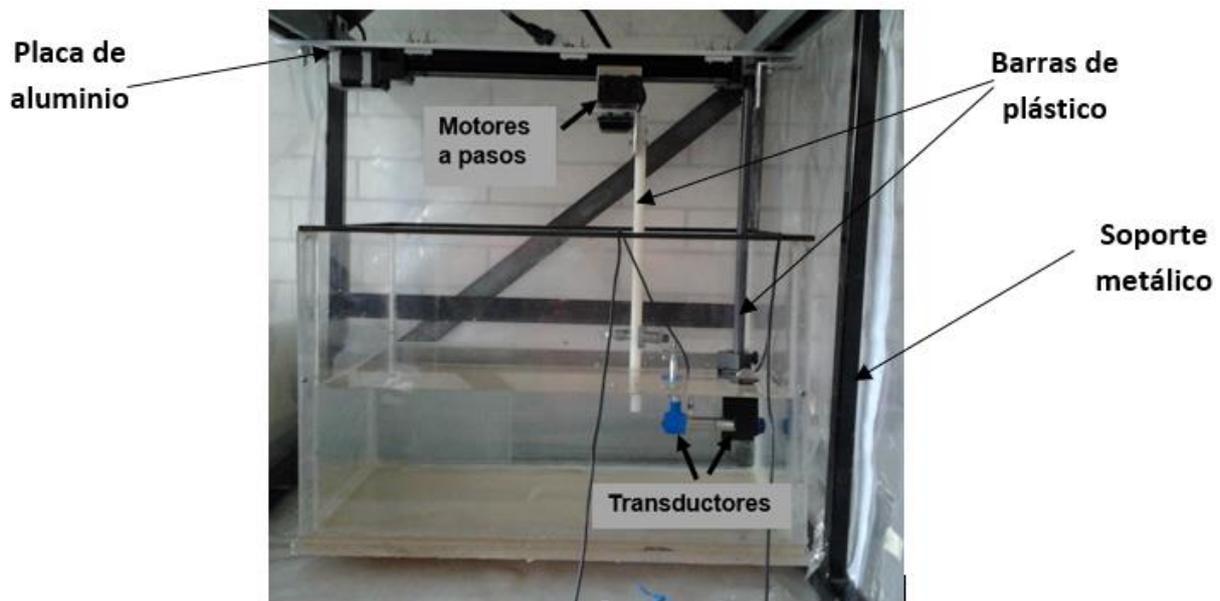


Figura 2.1. Montaje experimental, el transductor de la izquierda es utilizado como transmisor y el transductor de la derecha es empleado como receptor.

Los ensayos ultrasónicos por el método de inmersión son efectuados, por lo general, con sistemas automáticos, aunque pueden ser realizados mediante sistemas semiautomáticos. En un sistema de inmersión en tanque, tanto el objeto

a ensayar como el transductor están sumergidos en un tanque con material acoplador, éste puede ser agua [14].

El sistema consta de un tanque de acrílico de 50.5 cm de largo, 32.5 cm de ancho y 32 cm de alto, en él se sumergen dos transductores en agua hasta cubrirlos en su totalidad, uno como receptor y otro como transmisor.

El sistema mecánico está compuesto por dos motores a pasos controlados por computadora que permite mover al transductor-transmisor en el plano XY, para los desplazamientos en el eje X se seleccionó el motor de mayor longitud (42.24 cm) para observar si era posible determinar la distancia en los extremos del riel del motor, mientras que el motor pequeño (16.84 cm) se encarga de la alineación en el eje Y; en cuanto al transductor-receptor es alineado manualmente.

Los dos motores a pasos se unen uno sobre otro, con unas placas adaptadoras proporcionadas por el proveedor de los motores, una vez ensamblados, son montados sobre un placa de aluminio que es colgada en un soporte metálico. La barra de plástico en color blanco se fija con un ángulo a la base del motor, mientras la barra de color gris se atornilla al soporte metálico con un ángulo, finalmente en a las barras se le colocan unas pinzas para agarrar los transductores, ver la Figura 2.1. A continuación se da una descripción más detallada del equipo utilizado en las pruebas realizadas.

### 2.1.1 Transductores

Los transductores empleados son de inmersión para altas frecuencias (20 MHz a 100 MHz), ver Figura 2.2. Además, cuentan con una línea interna de retardo de sílice fundido (4.25  $\mu$ s) y una distancia focal plana.

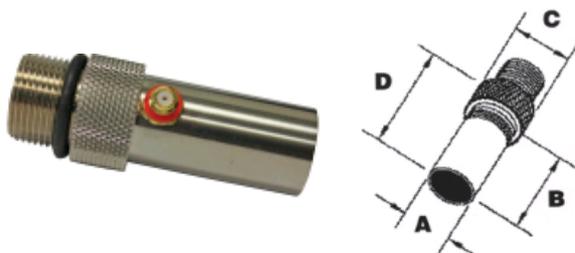


Figura 2.2. Transductor CTS Valpey Corporation.

| Dimensiones [mm] |       |       |        |
|------------------|-------|-------|--------|
| A                | B     | C     | D      |
| 15.748           | 30.48 | 15.24 | 39.624 |

Tabla 2.1. Dimensiones del transductor.

Para las pruebas realizadas en modo transmisión, el transductor utilizado como emisor de la señal ultrasónica trabaja a una frecuencia central de 20 MHz (CTS Valpey Corporation, VF401), mientras que el receptor de la señal es un transductor que trabaja a una frecuencia central de 50 MHz (CTS Valpey Corporation, VF409), se emplearon de este modo para poder obtener una señal, ya que si se utilizan de manera inversa, el transductor de 20 MHz no sería capaz de detectar la señal proveniente del transductor de 50 MHz. Para las pruebas en modo pulso-eco, el transductor con la frecuencia central de 20 MHz trabaja como transmisor y receptor.

### 2.1.2 Pulsador/Receptor

El generador de pulsos (aparato transmisor) proporciona el voltaje eléctrico para excitar al transductor y controla la potencia de transmisión de salida mediante el ajuste de la tensión aplicada. Un incremento en la amplitud de transmisión crea un pulso de mayor intensidad y mejora la detección del eco proveniente de reflectores más débiles [7].

Para generar y recibir el pulso de ultrasonido, se utilizó un dispositivo pulsador/receptor (JSR ultrasonics, modelo DPR300) como el que se muestra en la Figura 2.3.

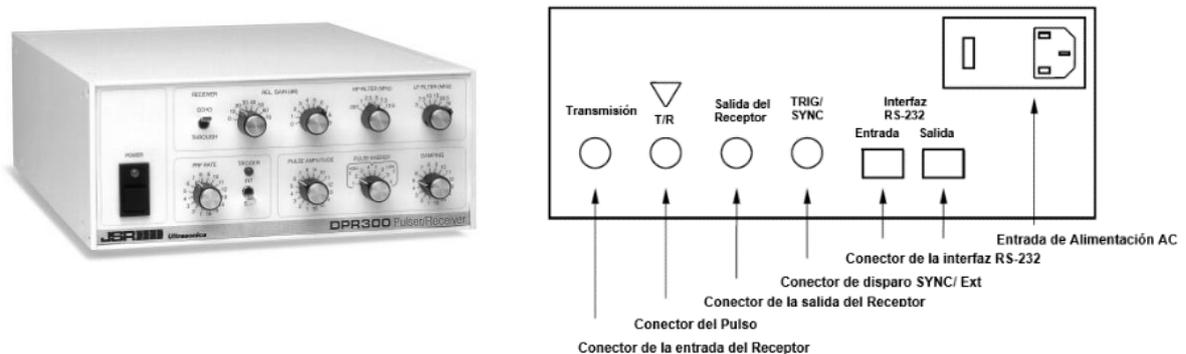


Figura 2.3. Panel frontal y parte trasera del pulsador/ receptor modelo DPR300.

El Pulsador/Receptor DPR300 se compone de bloques funcionales. Estos bloques incluyen el panel frontal y hardware de control remoto, fuente de alimentación de alta tensión, pulsador, seleccionador de trigger, oscilador PRF

(pulser repetition frequency), un amplificador receptor, receptor de filtros paso bajas y paso altas, y la interfaz RS-232, ver Figura 2.4.

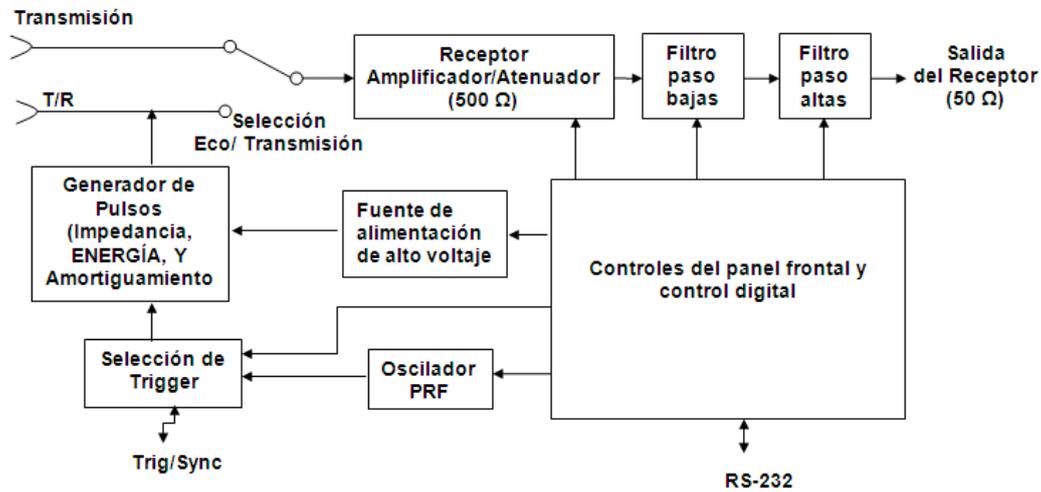


Figura 2.4. Diagrama de bloques del pulsador/receptor [15].

Este dispositivo permite la generación de un pulso de ultrasonido que puede ser configurado de manera manual a través del panel frontal del dispositivo o mediante la interfaz RS-232. Las características que pueden ajustarse son: amplitud, impedancia, amortiguamiento, modo y frecuencia de repetición del pulso. Además de la posibilidad de seleccionar la ganancia del receptor y la frecuencia de corte de filtros paso bajas y paso altas. La tabla 2.2 muestra los parámetros que se pueden configurar del pulso.

| <b>Pulsador/ Receptor DPR300</b>              |  |
|---|--|
| Amplitud del pulso [V]                        | De 100 hasta 475   |
| Impedancia del pulso                          | Alta o baja  |
| Frecuencia de repetición del pulso (PRF) [Hz] | De 100 hasta 5000  |
| Modo  | Transmisión o Eco  |
| Ganancia del receptor [dB]                    | De -13 hasta 66  |
| Ancho de banda del receptor [MHz]             | 35 MHz   |
| Filtro paso altas [MHz]                       | 1, 2.5, 5, 7.5 y 12.5  |
| Filtro paso bajas [MHz]                       | 3, 7.5, 10, 15, 22.5 y 35  |
| Amortiguamiento [Ω]                           | 24.6, 26.3, 28.1, 30.3, 32.7, 35.7, 39.2, 43.5, 48.7, 55.6, 64.5, 76.9, 95.2, 125, 182 y 333 |

Tabla 2.2. Características del pulsador/receptor.

### 2.1.3 Muestras

Las muestras sumergidas para las pruebas realizadas fueron montadas sobre unas bases que se colocaron en el fondo del tanque, estas bases fueron fabricadas con porta objetos, ajustando el grosor de la muestra para evitar que se moviera. Además de que en algunos casos fue necesario ajustar la altura del soporte para que muestras más pequeñas quedaran enfrente y a la misma altura de los transductores.

Las muestras utilizadas fueron: un porta objetos, un cubre objetos, una cápsula de agua, una cápsula de acetona y una cápsula de aceite de oliva. Para la elección de las muestras se buscaron materiales con propiedades (impedancia acústica, densidad y velocidad de propagación del ultrasonido en medio) diferentes a las de nuestro medio de referencia (agua), es decir, el cubre objetos (Borosilicato) y el porta objeto (Sodocálcico) tienen valores superiores en estas propiedades, mientras que el aceite y la acetona tienen valores menores con respecto al agua.

Para el caso de las cápsulas se fabricaron con dos porta objetos y un anillo de hule, de tal forma que en medio de los porta objetos se pega el anillo de hule, en donde posteriormente se inyectó el material deseado (agua, acetona, aceite). En la Figura 2.5 se muestra la configuración de cápsula y el soporte de las muestra.

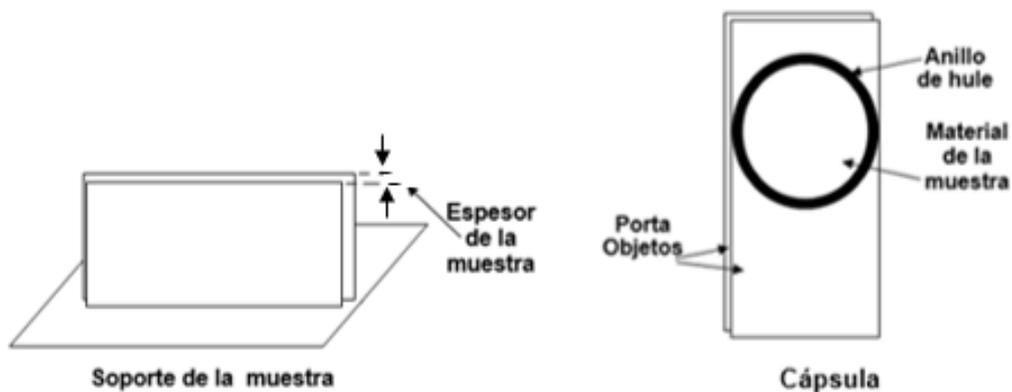


Figura 2.5. En lado izquierdo se muestra el diagrama del soporte de las muestras y en lado derecho la configuración de las cápsulas.

En la tabla 2.3, se presentan algunas de las propiedades acústicas de las muestras, como son el tipo de material, la velocidad con la que se propaga el ultrasonido en el material, su densidad, la impedancia y el espesor de la muestra utilizada:

| Muestra            | material        | velocidad de propagación del ultrasonido [m/s] | densidad [kg/m <sup>3</sup> ] | impedancia [kgm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> x 10 <sup>6</sup> ] | espesor [mm] |
|--------------------|-----------------|--|-------------------------------|---|--------------|
| Porta Objetos      | Sodocálcico     | 6000   | 2.24                          | 13.1  | 0.9          |
| Cubre Objetos      | Borosilicato    | 5660   | 2.49                          | 14.09   | 0.13         |
| Cápsula de agua    | Agua            | 1480   | 1000                          | 1.48  | 1.5          |
| Cápsula de acetona | Acetona         | 1174   | 0.791                         | 1.07  | 1.5          |
| Cápsula de Aceite  | Aceite de oliva | 1445   | 0.918                         | 1.32  | 1.5          |

Tabla 2.3. Características y propiedades de las muestras.

## 2.2 Medición del tiempo de vuelo

La velocidad de propagación del sonido en un material se obtiene a partir de la diferencia en los tiempos de vuelo (Time Of Flight, TOF por sus siglas en inglés) entre la señal transmitida a través del material de referencia y la señal que se transmite a través del material de referencia y la muestra.

Sea  $L$  la distancia entre el transmisor y el receptor,  $l$  el ancho de la muestra en la dirección de propagación,  $c_{ref}$  la velocidad de propagación del sonido en el material de referencia y  $c$  la velocidad de propagación del sonido en la muestra, se tienen las siguientes relaciones para el tiempo de vuelo:

Cuando solo atraviesa el material de referencia:

$$TOF^{ref} = \frac{L}{c_{ref}}, \quad (2.1)$$

Cuando atraviesa el material de referencia y la muestra:

$$TOF = \frac{L-l}{c_{ref}} + \frac{l}{c}, \quad (2.2)$$

La diferencia entre señales:

$$\Delta TOF = \frac{l}{c} - \frac{l}{c_{ref}}, \quad (2.3)$$

$$c = \frac{1}{\frac{1}{c_{ref}} + \frac{\Delta TOF}{l}}, \quad (2.4)$$

Si las mediciones en las muestras son tomadas usando pruebas en contacto directo la ecuación se reduce a:

$$c = \frac{l}{TOF}, \quad (2.5)$$

Varios criterios se utilizan para estimar el tiempo de vuelo, por ejemplo el primer punto de llegada de la señal (1), un umbral fijo (2), el primer cruce por cero (3), o la máxima amplitud de la señal eléctrica recibida (4) como se muestra en la Figura 2.6 [16].

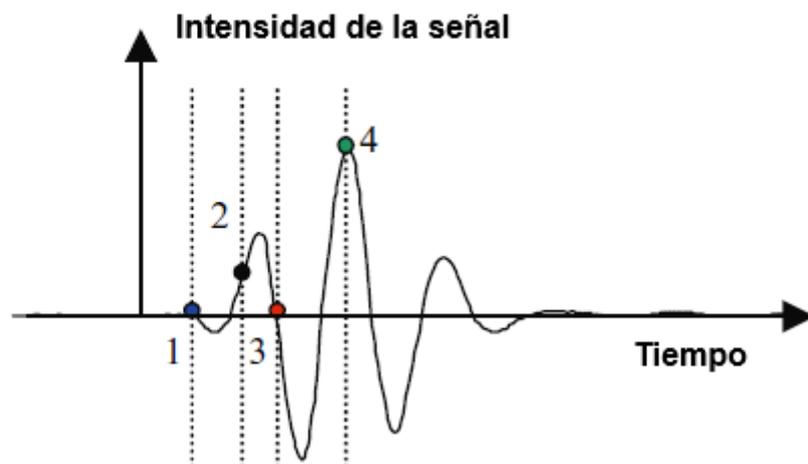


Figura 2.6. Diferentes criterios usados para medir tiempo de vuelo: (1) primera desviación aparente del cero (2) Umbral fijo (3) primer cruce por cero (4) máximo.

El criterio seleccionado para estimar el tiempo de vuelo en este trabajo fue seleccionar un umbral fijo en la parte decreciente de la señal de ultrasonido.

### 2.3 Caracterización del desplazamiento de los motores

Para determinar que el sistema de posicionamiento mecánico basado en motores a pasos realizara desplazamientos correspondientes a 2.5  $\mu\text{m}$  por paso, se necesitó calcular la distancia entre el transductor-transmisor y el transductor-receptor a partir del tiempo de vuelo de la señal de ultrasonido.

Para realizar esta tarea fue necesario montar el arreglo mostrado en la Figura 2.1, con un transductor-transmisor de 20 MHz y un transductor-receptor de 50 MHz, una vez montado se procedió alejar el transductor-transmisor del transmisor-receptor con avances para distancias de (a) 10 pasos (25  $\mu\text{m}$ ), (b) 50 pasos (125  $\mu\text{m}$ ) y (c) 400 pasos (1 mm).

La señal de ultrasonido enviada por el pulsador/receptor se transmite con una frecuencia de repetición del pulso (Pulse Repetition Frequency, PRF por sus siglas en inglés) de 5 kHz, con un voltaje de 350 V y un amortiguamiento de 44  $\Omega$ . El receptor se configura con una ganancia de 20 dB y con todo el ancho de banda disponible, es decir, con un filtro paso altas de 0 Hz y un filtro paso bajas de 35 MHz.

Los datos de la señal de ultrasonido son registrados en un osciloscopio digital (Tektronix, serie TDS3000C) y almacenados en un dispositivo USB; para posteriormente analizar la diferencia entre los tiempos de vuelo cuando la señal inicia en una posición con una cierta distancia.

A continuación se muestran en las figuras 2.7, 2.8 y 2.9, las gráficas de los datos de la señal de ultrasonido. El criterio utilizado para estimar el tiempo fue analizar el primer descenso de la señal después de cruzar por cero, en donde  $T_0$  corresponde al tiempo de vuelo de la posición inicial y  $T_1$ ,  $T_2$ , etc. Son los tiempos de vuelo cuando el transductor-transmisor es desplazado cierta distancia.

Para calcular la distancia entre los transductores se utiliza la ecuación (2.6), considerando una velocidad de propagación del ultrasonido en el agua de 1480 m/s y la diferencia entre los tiempos de vuelo de la señal [16].

$$L = c_{\text{agua}} * \Delta TOF , \quad (2.6)$$

a) 10 pasos,

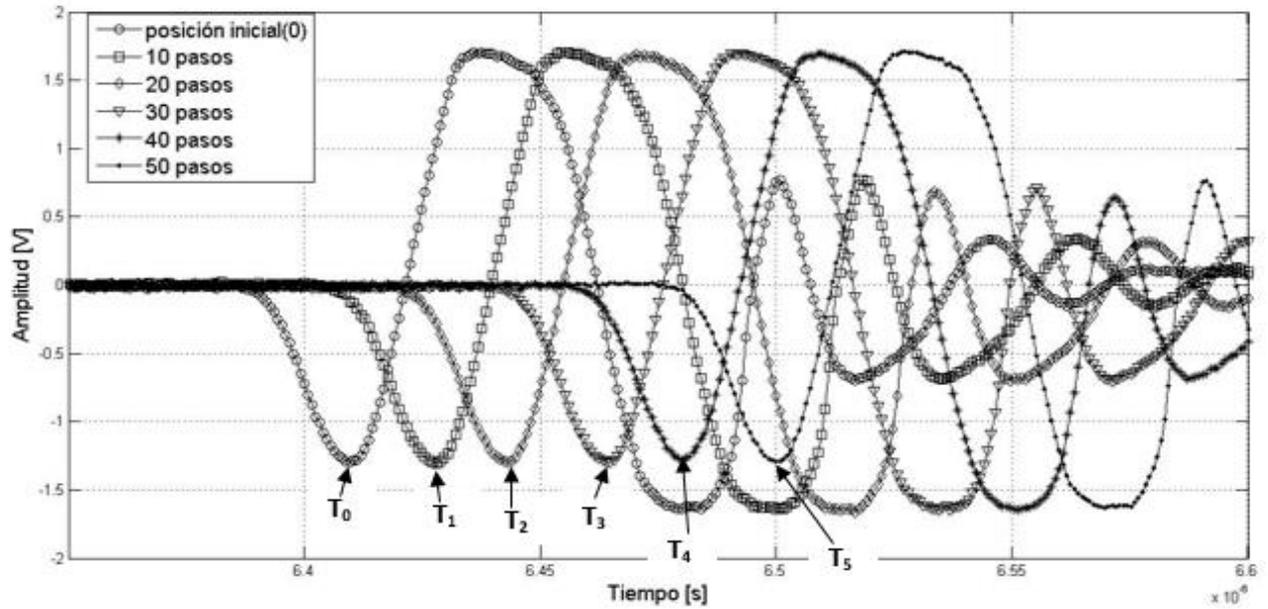


Figura 2.7. Desplazamientos del motor cada 10 pasos (25  $\mu\text{m}$ ).

|       | Desplazamiento del motor en Pasos | Desplazamiento del motor ( $V_i$ ) [ $\mu\text{m}$ ] | $\Delta\text{TOF}$ [ $\mu\text{s}$ ] | Desplazamiento medido ( $V_m$ ) [ $\mu\text{m}$ ] | Porcentaje de Error $e = \left(\frac{V_t - V_m}{V_t}\right) \times 100$ [%] |
|-------|-----------------------------------|--|--------------------------------------|---|---|
| $T_0$ | 0                                 | 0  | 0                                    | 0   |   |
| $T_1$ | 10                                | 25   | 0.0181                               | 26.788  | 7.152   |
| $T_2$ | 20                                | 50   | 0.0333                               | 49.284  | 1.432   |
| $T_3$ | 30                                | 75   | 0.0548                               | 81.104  | 8.139   |
| $T_4$ | 40                                | 100  | 0.0706                               | 104.488   | 4.488   |
| $T_5$ | 50                                | 125  | 0.0903                               | 133.644   | 6.9152  |

Tabla 2.4. Relación para desplazamientos cada 10 pasos (25  $\mu\text{m}$ ).

b) 50 pasos,

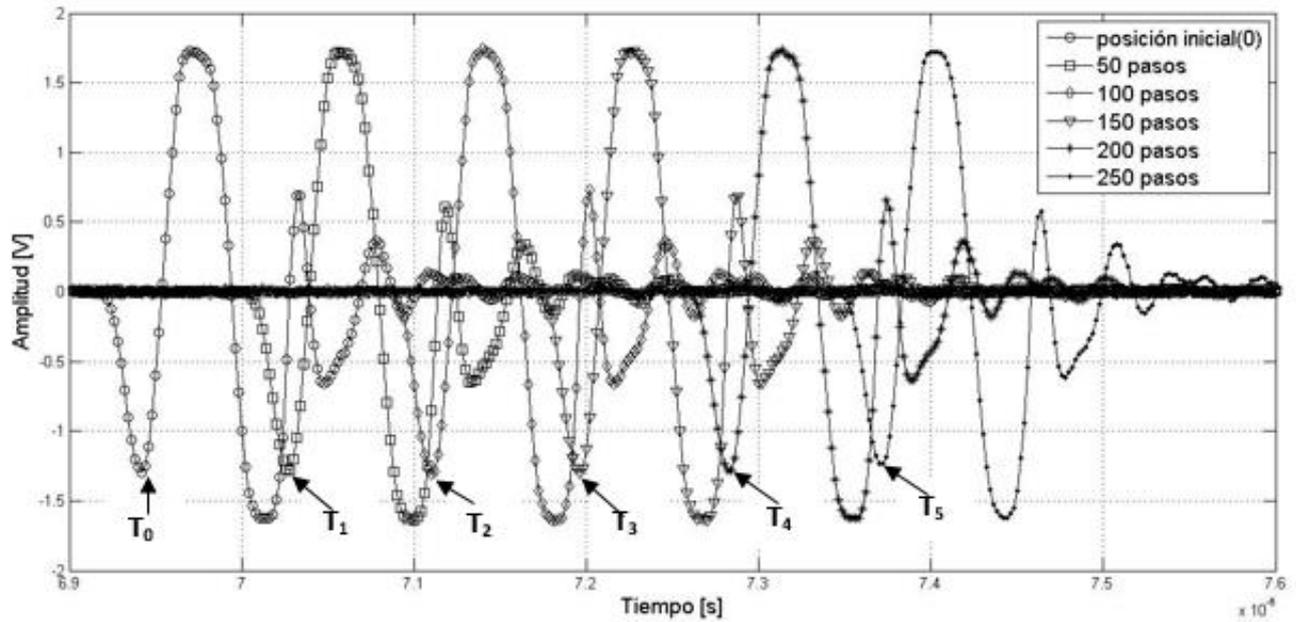


Figura 2.8. Desplazamientos del motor cada 50 pasos (125  $\mu\text{m}$ ).

|       | Desplazamiento del motor en Pasos | Desplazamiento del Motor ( $V_t$ ) [ $\mu\text{m}$ ] | $\Delta\text{TOF}$ [ $\mu\text{s}$ ] | Desplazamiento medido ( $V_m$ ) [ $\mu\text{m}$ ] | Porcentaje de Error $e = \left(\frac{V_t - V_m}{V_t}\right) \times 100$ [%] |
|-------|-----------------------------------|--|--------------------------------------|---|---|
| $T_0$ | 0                                 | 0  | 0                                    | 0   |   |
| $T_1$ | 50                                | 125  | 0.0866                               | 128.168   | 2.534   |
| $T_2$ | 100                               | 250  | 0.1691                               | 250.268   | 0.1072  |
| $T_3$ | 150                               | 375  | 0.2556                               | 378.288   | 0.877   |
| $T_4$ | 200                               | 500  | 0.3423                               | 506.604   | 1.321   |
| $T_5$ | 250                               | 625  | 0.4317                               | 638.916   | 2.227   |

Tabla 2.5. Relación para desplazamientos cada 50 pasos (125  $\mu\text{m}$ ).

c) 400 pasos,

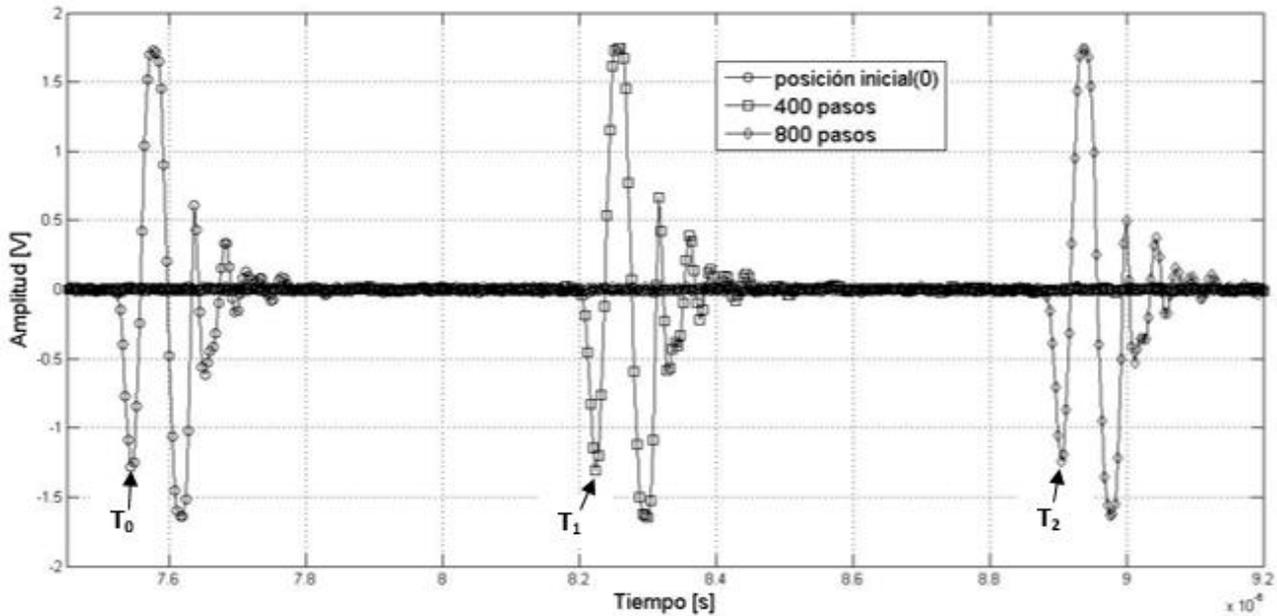


Figura 2.9. Desplazamientos del motor cada 400 pasos.

|       | Desplazamiento del motor en Pasos | Desplazamiento del Motor ( $V_t$ ) [mm] | $\Delta$ TOF [ $\mu$ s] | Desplazamiento medido ( $V_m$ ) [mm] | Porcentaje de Error $e = \left(\frac{V_t - V_m}{V_t}\right) \times 100$ [%] |
|-------|-----------------------------------|---|-------------------------|--------------------------------------|---|
| $T_0$ | 0                                 | 0                                       | 0                       | 0                                    |   |
| $T_1$ | 400                               | 1                                       | 0.6812                  | 1.0082                               | 0.82  |
| $T_2$ | 800                               | 2                                       | 1.3618                  | 2.0155                               | 0.775   |

Tabla 2.6. Relación para desplazamientos cada 400 pasos (1 mm).

## 2.4 Modo pulso-eco

Aunque algunas mediciones ultrasónicas especializadas se hacen en modo de onda continua (Continuous Wave, CW por sus siglas en inglés), la mayoría se hacen en modo de pulso-eco (Pulse Echo, PE por sus siglas en inglés, donde un pulso ultrasónico es emitido desde el transductor y los ecos provenientes de diversos obstáculos son recibidos por el mismo transductor, ver Figura 2.10 [2].

En la operación de pulsos en modo pulso-eco, el haz de ultrasonido se transmite de manera pulsada, con la mayoría del tiempo ocupado para la escucha de ecos. El pulso de ultrasonido se crea con una forma de onda corta de tensión proporcionado por el generador de pulsos del sistema de ultrasonidos. El pulso

generado es típicamente de dos a tres ciclos, dependiendo de las características de amortiguamiento de los elementos transductores [7].

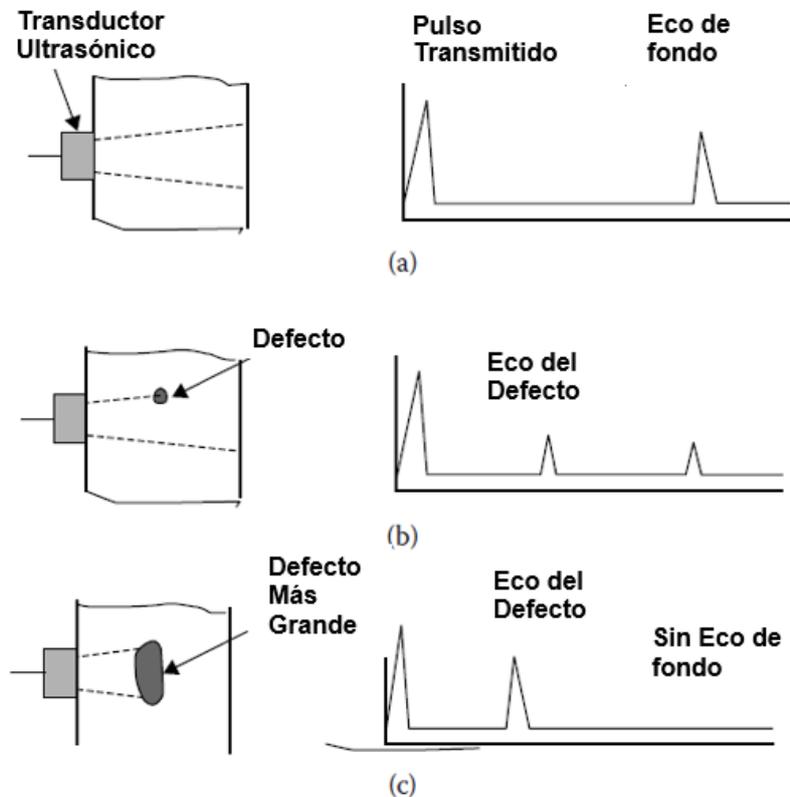


Figura 2.10. Método pulso-eco, en donde; (a) espécimen libre de defectos; (b) espécimen con pequeños defectos; (c) espécimen con grandes defectos.

### 2.4.1 Pruebas en modo pulso-eco

La conexión realizada del pulsador/receptor en la modalidad de operación pulso-eco se muestra en la Figura 2.11. El transductor que emite y recibe la señal de ultrasonido trabaja a una frecuencia central de 20 MHz, este transductor es conectado al pulsador/receptor mediante un cable coaxial de 50 Ω.

La configuración del pulsador/receptor se realiza mediante la computadora vía RS-232, seleccionando la modalidad pulso-eco. El transmisor emite un pulso de excitación eléctrica de alto voltaje de 475 V, con una frecuencia de repetición del pulso (PRF) de 1 KHz y un amortiguamiento de 25 Ω. El receptor está configurado con un filtro paso bajas de 35 MHz y un filtro paso altas de 0 MHz, para tener disponible todo el ancho de banda del dispositivo (pulsador/receptor) y con una ganancia de 10 dB.

Para visualizar la señal de ultrasonido y sus ecos se emplea el osciloscopio (Tektronix, serie TDS3000C), almacenando los datos de la señal en el dispositivo USB.

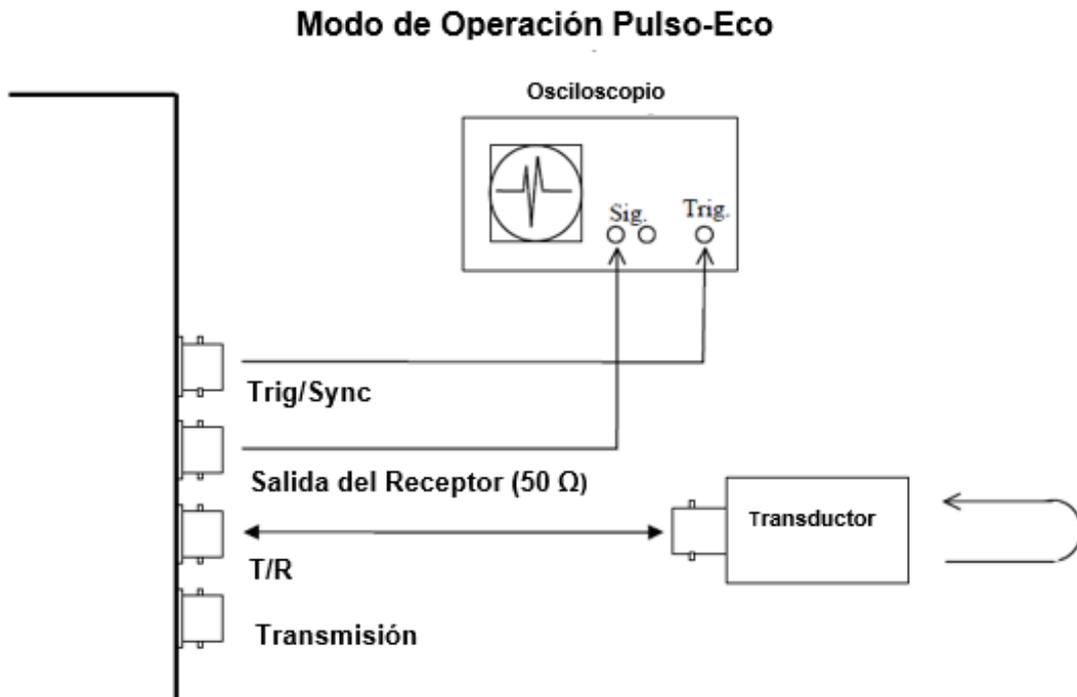


Figura 2.11. Conexión del pulsador/receptor en modo de operación pulso-eco [15].

Las pruebas se realizaron colocando el transductor de 20 MHz junto a la muestra (porta objetos), tomando la señal como posición inicial. Posteriormente se alejó el transductor con el motor a pasos con desplazamientos cada 1 mm, registrando los avances del motor hasta 4 mm. En la Figura 2.12, se ejemplifica la forma en que se colocaron los dispositivos, (a) el transductor esta junto al porta objetos lo más cerca posible, mientras que en (b) el motor a pasos es desplazado un milímetro en el en el eje  $-X$ .

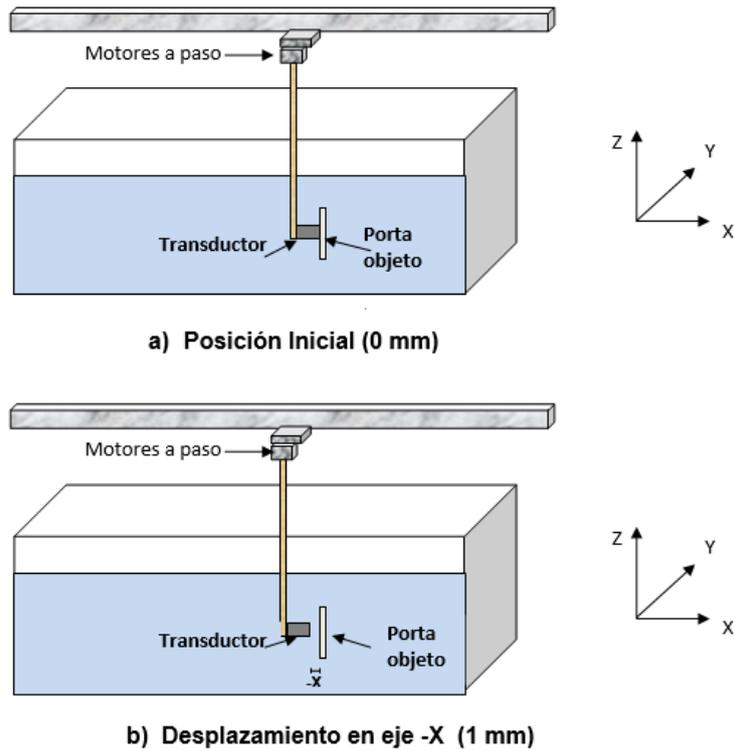


Figura 2.12. Pruebas en modo pulso-eco.

## 2.5 Modo transmisión

Es la técnica de medición de la cantidad o intensidad del sonido transmitido a través de la muestra examinada; en donde se emplean dos transductores, un emisor y otro receptor, situados en cada uno de los lados de la muestra, ver Figura 2.13.

Permite observar la amplitud de los impulsos recibidos, lo que indica la presencia de defectos en la muestra (si es que existen la amplitud será menor).

Es muy útil en los ensayos de inmersión, pero presenta algunos inconvenientes:

- No se puede determinar la posición exacta de los defectos localizados. Sólo es posible detectar que existen, pero no a qué profundidad (para ello sería necesario explorar la muestra en dos direcciones).
- Es imprescindible mantener los transductores emisor y receptor perfectamente alineados, lo que lo hace un método lento y tedioso.

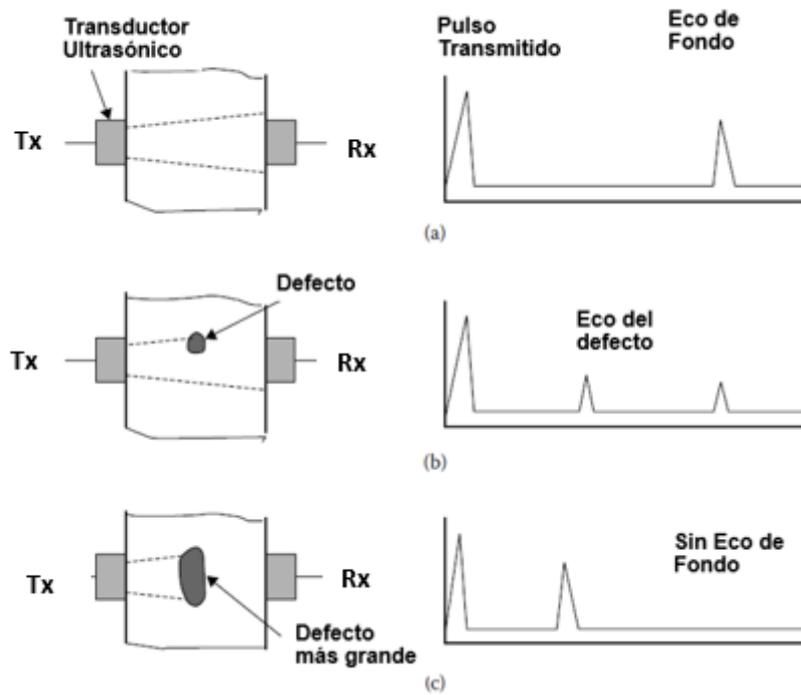


Figura 2.13. Configuración en modo transmisión: (a) espécimen libre de defectos; (b) espécimen con pequeños defectos; (c) espécimen con mayores defectos.

### 2.5.1 Pruebas modo transmisión

Para la conexión en modo transmisión al pulsador/receptor se le conectan los dos transductores vía cable coaxial de 50  $\Omega$ , el transductor-transmisor opera a una frecuencia central de 20 MHz y es conectado en el panel trasero en la conexión T/R , mientras el transductor-receptor trabaja a una frecuencia central de 50 MHz se conecta en transmisión, ver Figura 2.14.

Con apoyo del controlador manejado desde una computadora, se selecciona la modalidad de transmisión en el pulsador/receptor y se envía un pulso de ultrasonido con una amplitud de 475 V, con una frecuencia de repetición del pulso (PRF) de 1 KHz y un amortiguamiento de 25  $\Omega$ , el receptor del dispositivo se configura con un filtro paso bajas de 35 MHz y un filtro paso altas de 0 MHz ocupando todo el ancho de banda disponible del pulsador/receptor.

## Modo de Operación Transmisión

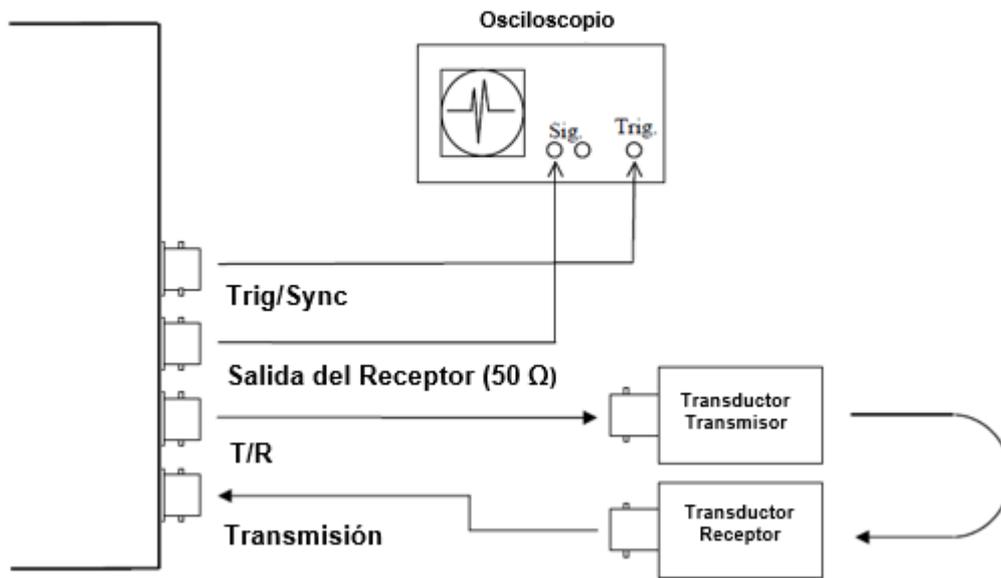


Figura 2.14. Conexión del pulsador/receptor en modo de operación Transmisión [15].

Los pasos realizados en las pruebas en modo transmisión son los siguientes y se ilustran en la Figura 2.15:

1. Se alinean y se juntan los dos transductores para tener una referencia de la señal de ultrasonido.
2. Se aleja el transductor-transmisor (20 MHz) del transductor-receptor (50 MHz) 3 cm.
3. Una vez alejado los transductores se coloca una muestra junto al transductor-transmisor (Tx).
4. Se vuelve a alejar el transductor-transmisor 3 cm, de tal forma que la separación entre transductores es de 6 cm y a 3 cm entre la muestra
5. Se retira la muestra.

Los datos de la señal de ultrasonido son medidos con ayuda de un osciloscopio digital (Tektronix, serie TDS3000C), almacenando la curva obtenida en cada uno de los experimentos anteriores, guardándolos a través de un dispositivo USB para su posterior análisis.

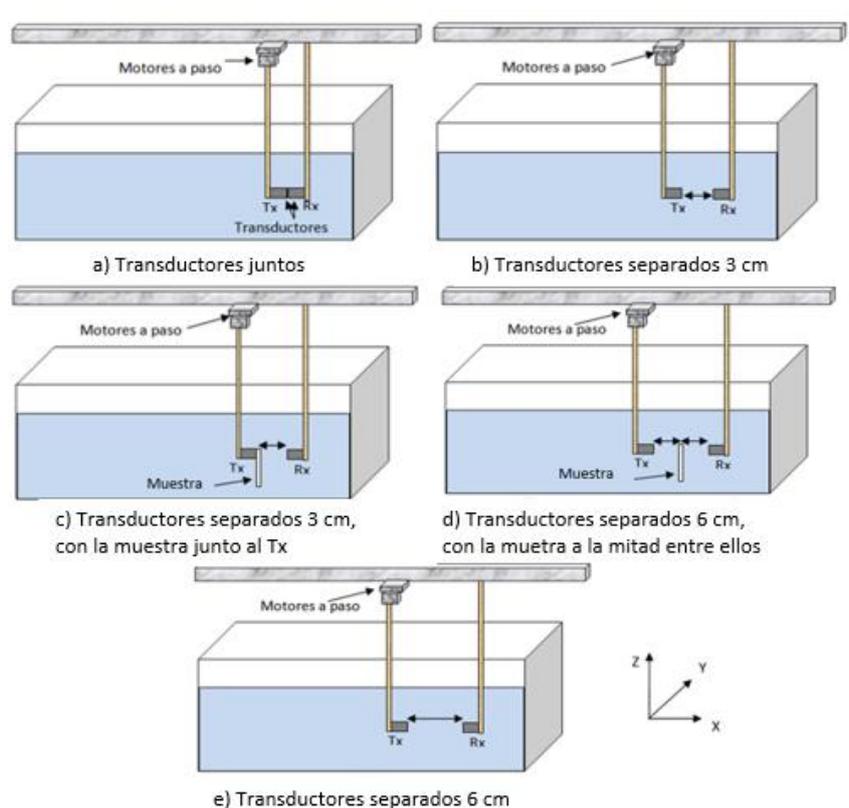


Figura 2.15 Pruebas en modo transmisión.

## 2.6 Conclusiones de capítulo

Un punto importante para la caracterización de los desplazamientos de los motores a pasos, es la obtención del tiempo de vuelo del pulso emitido y los ecos de las señales de ultrasonido (TOF), con esta información y conociendo la velocidad de propagación en el medio (en este caso se utilizó agua), fue posible determinar la separación que existe entre el transductor-transmisor y el transductor-receptor para hacer una correlación entre el número de pasos y la distancia en submúltiplos del metro. Además mediante este método de medición se pudo determinar que el dispositivo nos permite obtener distancias del orden de micrómetros, con una resolución de  $2.5 \mu\text{m}$ .

Se observaron dos configuraciones para la medición de ultrasonido, una en la que el transductor tiene la función de enviar y recibir la señal de ultrasonido (modo eco) y otra en la que se utiliza un transductor para enviar y otro para recibir la señal, en este último se observó que se debe cuidar mucho la alineación entre los transductores para tener una buena lectura de la amplitud del pulso.

## Capítulo III

En este capítulo se muestran los resultados de las pruebas realizadas en el capítulo anterior, explicando la forma en que se interpretaron los datos adquiridos para determinar las distancias empleando ondas de ultrasonido.

En un primer análisis se muestran los resultados obtenidos para diferentes desplazamientos con los motores a pasos, de tal forma que, para pruebas en modo pulso-eco y modo transmisión, se calcula la distancia que hay entre los transductores para asociarlo con el número de pasos. Posteriormente se hace un análisis para observar qué ocurre con la señal al pasar por diferentes medios de propagación con velocidades de propagación del ultrasonido mayores y menores a la del agua.

### 3.1 Resultados en modo pulso-eco

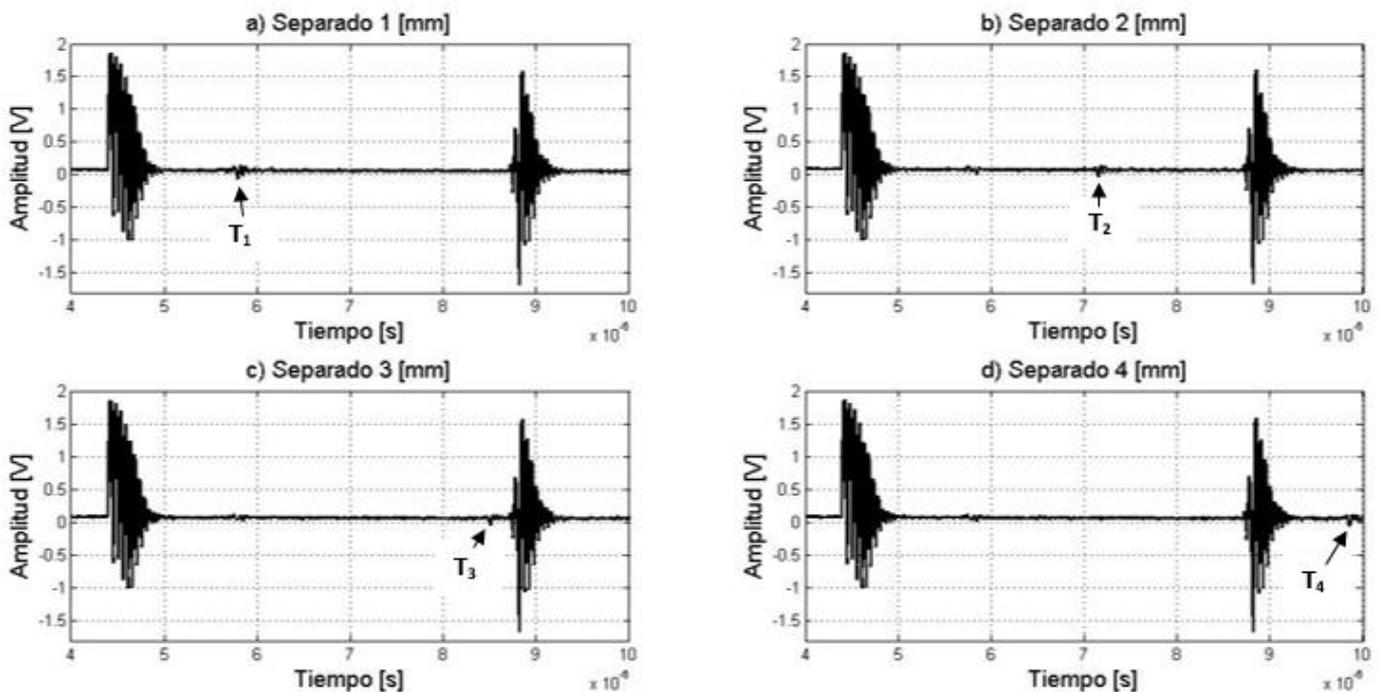


Figura 3.1. Señales de ultrasonido obtenidas al alejar el motor a pasos de un porta objetos en modo pulso-eco, con desplazamientos de 1 [mm]. T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub>, y T<sub>4</sub> son las señales de los ecos obtenidos al alejar el transductor de la muestra.

La señal con mayor amplitud de la Figura 3.1, corresponde a la señal de excitación del pulso, en un tiempo más tarde (4.32 μs), la señal con menor amplitud corresponde al eco de la señal, esto sucede por la línea de retardo con la que cuenta el transductor, la ventaja de este tipo de separación es que se

genera un retardo de tiempo entre la generación de la onda de ultrasonido y la llegada de la onda reflejada mejorando la lectura en las zonas cercanas a la superficie del material en el que se encuentra en contacto el transductor[17]. Por otro lado las señales con menor amplitud ( $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  y  $T_4$ ) son las réplicas de la señal para los desplazamientos del motor a pasos cuando se está alejando el transductor-transmisor del porta objetos.

Debido a que en modo pulso-eco el mismo transductor es utilizado como transmisor y receptor, los tiempos medidos de vuelo de las señales de ultrasonido ( $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  y  $T_4$ ), deben ser divididos entre dos, para determinar la distancia entre el transmisor y la muestra en donde es reflejada la señal, ya que la señal tarda el doble de tiempo en recorrer la distancia. Con apoyo de la ecuación 3.1, se determinaron las distancias tal y como se muestra en la tabla 3.1.

$$L = \frac{c_{agua} * \Delta TOF}{2}, \quad (3.1)$$

| <b>Desplazamientos en modo eco</b> |   |   |   |   |
|------------------------------------|---|---|---|---|
|                                    | <b>Desplazamiento del motor (<math>V_t</math>) [mm]</b> | <b><math>\Delta TOF</math> [<math>\mu s</math>]</b> | <b>Distancia medida con ultrasonido (<math>V_m</math>) [mm]</b> | <b>Porcentaje de Error <math>e = \left(\frac{V_t - V_m}{V_t}\right) \times 100</math> [%]</b> |
| $T_1$                              | 1   | 1.34  | 0.992   | 0.8   |
| $T_2$                              | 2   | 2.7   | 1.998   | 0.1   |
| $T_3$                              | 3   | 4.05  | 2.997   | 0.1   |
| $T_4$                              | 4   | 5.41  | 4.003   | 0.08  |

Tabla 3.1 Desplazamientos en modo pulso-eco.

Con los resultados obtenidos en el cálculo de las distancias a las que se encuentra separado el transductor del porta objetos, podemos verificar que con el sistema propuesto se puede determinar la ubicación de las muestras empleando pulsos de ultrasonido.

## 3.2 Resultados en modo transmisión

### 3.2.1. Muestra: porta objetos

En la Figura 3.2, se muestran las señales de ultrasonido cuando se trabaja en el modo transmisión. Se comprueba que los desplazamientos logrados con los motores a pasos corresponden a los medidos con ultrasonido para 3 cm y 6 cm mediante la diferencia entre los tiempos de vuelo  $T_1$  y  $T_2$ , tal y como se muestra en la tabla 3.2.

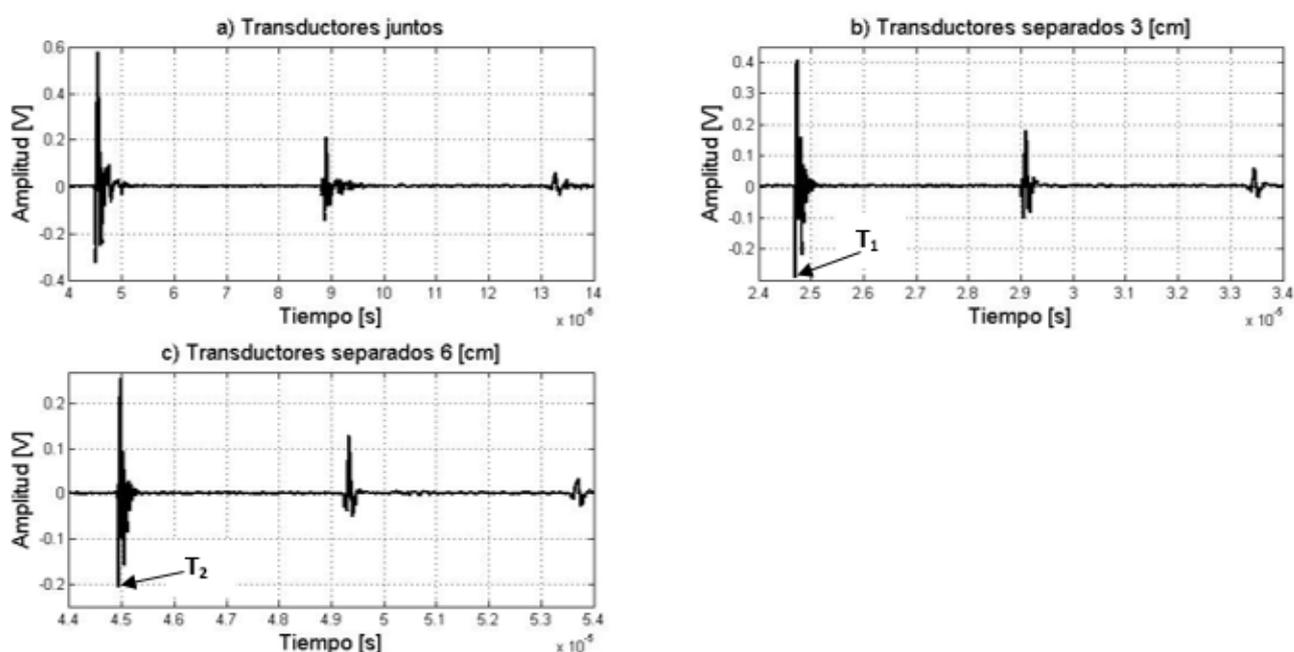


Figura 3.2. Señales de ultrasonido empleando la configuración en modo de transmisión, utilizando agua como medio de propagación. Note que las escalas de los ejes son diferentes para todos los casos.

| Desplazamientos en Modo Transmisión     |                          |   |   |
|---|--------------------------|---|---|
| Desplazamiento del motor ( $V_t$ ) [cm] | $\Delta TOF$ [ $\mu s$ ] | Distancia medida con ultrasonido ( $V_m$ ) [cm] | Porcentaje de Error $e = \left(\frac{V_t - V_m}{V_t}\right) \times 100$ [%] |
| 3                                       | 20.18                    | 3.027   | 0.9   |
| 6                                       | 40.43                    | 6.064   | 1.07  |

Tabla 3.2 Desplazamientos en modo transmisión.

En la Figura 3.3 se observan las señales obtenidas cuando se colocó la muestra, de tal forma que el medio de propagación es heterogéneo (agua-porta objetos-agua).

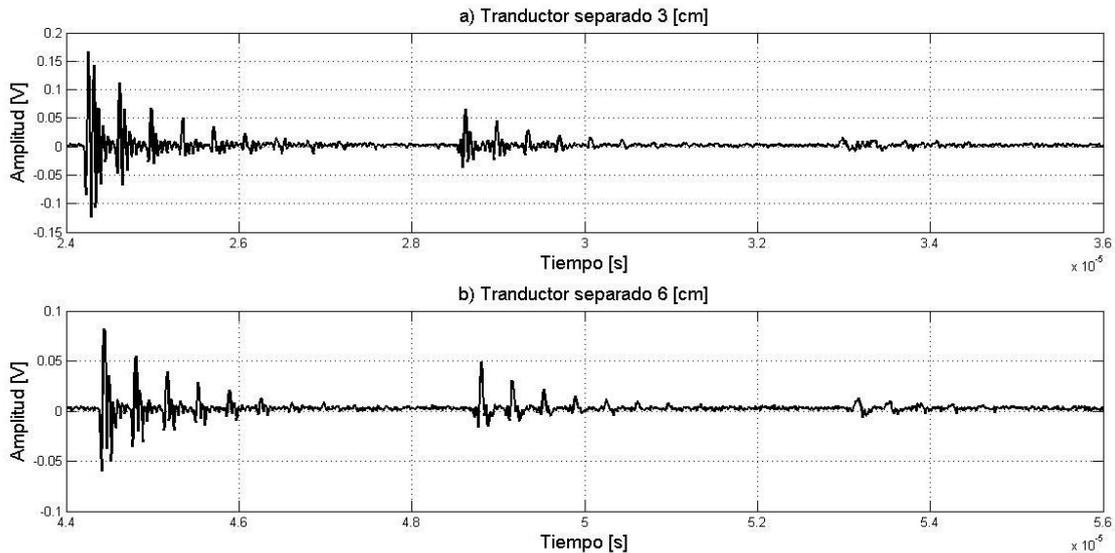


Figura 3.3. Señales de ultrasonido empleando la configuración en modo transmisión, con un medio de propagación heterogéneo (agua-porta objetos- agua). Note que las escalas de los ejes no son los mismos.

En todas las señales podemos observar que la excitación del pulso de ultrasonido se atenúa cuando se presentan los ecos de la señal (4.32  $\mu$ s debido a la línea interna de retardo del transductor) y a medida que la separación entre los transductores es mayor, la amplitud de la señal es menor. Además, cuando se tiene un medio de propagación heterogéneo se aprecia un adelanto de la señal, a diferencia de cuando se tiene un medio de propagación homogéneo, debido a que la velocidad de propagación del ultrasonido en el porta objetos es mayor a la del agua.

En la Figura 3.4, se muestra un acercamiento de las señales donde los transductores están separados 3 cm con y sin la muestra. La señal con línea punteada se adelanta 0.45  $\mu$ s a la de línea continua, ya que la velocidad de propagación del sonido en el porta objetos (vidrio sodocálcico) es de 6000 m/s, en cuanto a la duración del pulso es de 0.362  $\mu$ s para ambos casos, la diferencia aparece cuando se agrega el porta objetos, presentando múltiples reflexiones. La señal con mayor amplitud del pulso es de 0.7  $V_{pp}$  para el medio homogéneo y de 0.28  $V_{pp}$  para el medio heterogéneo.

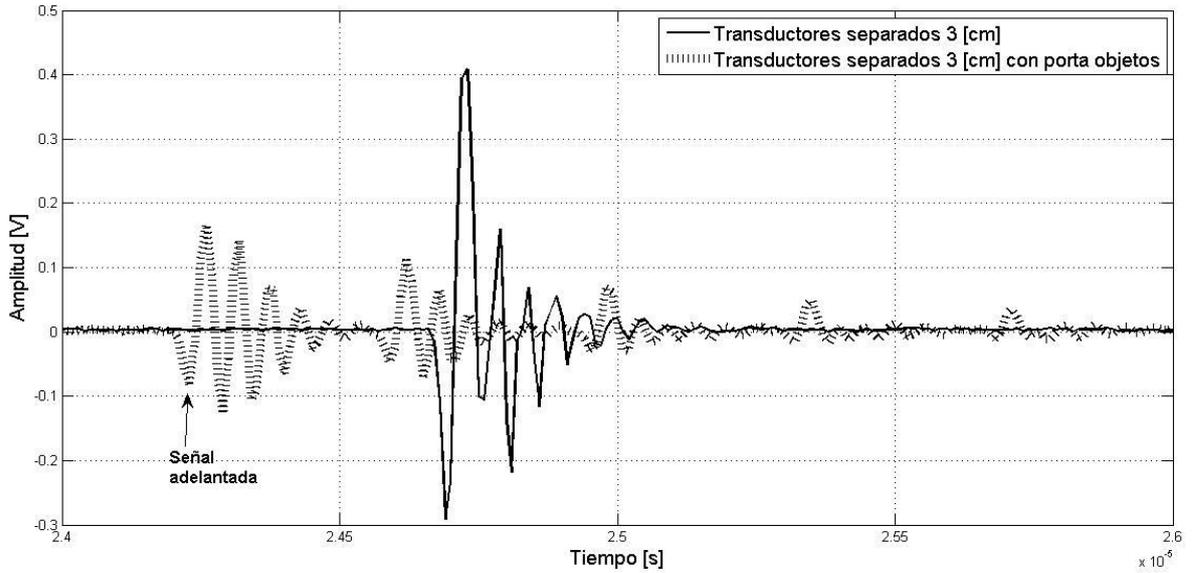


Figura 3.4. Transductores separados 3 cm, con porta objetos y sin porta objetos.

Cuando los transductores están separados 6 cm ocurre lo mismo que en el caso anterior, se tiene un adelanto de la señal en color verde de 0.52  $\mu\text{s}$ , duración de la señal de 0.362  $\mu\text{s}$  y las múltiples reflexiones. La amplitud de la señal de línea continua es de 0.47  $V_{pp}$  y la de línea punteada es 0.14  $V_{pp}$ , ver Figura 3.5.

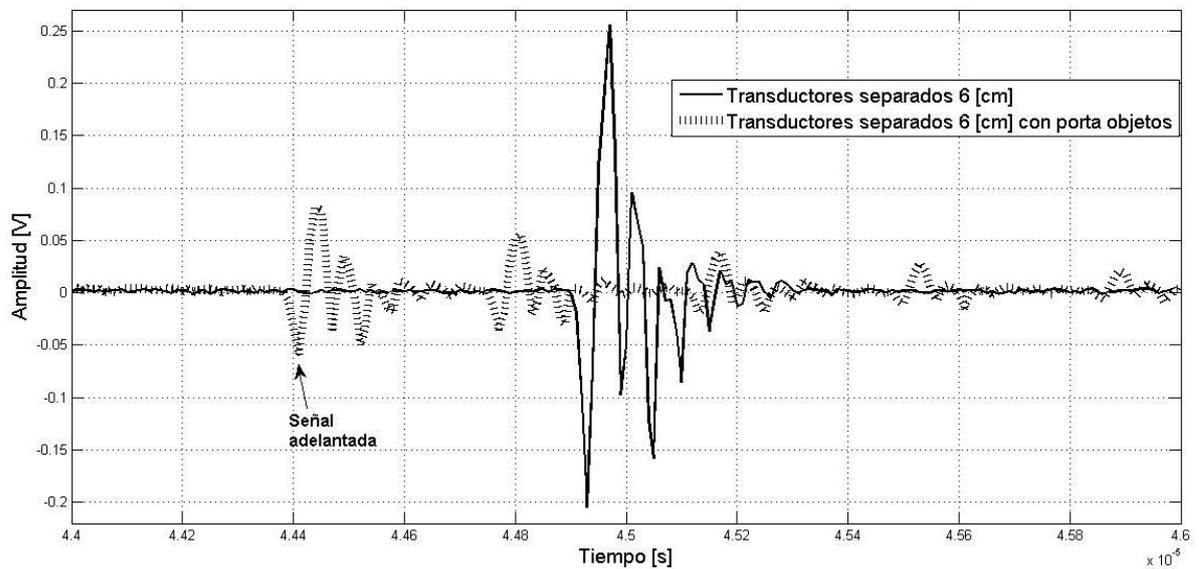


Figura 3.5. Transductores separados 6 cm, con porta objetos y sin porta objetos.

Para verificar el adelanto de la señal de ultrasonido obtenido de manera práctica, se calculó la diferencia del tiempo de vuelo ( $\Delta TOF$ ) de las señales, para ello se sustituye en la ecuación 2.3 el espesor del porta objetos  $l$ , la velocidad de propagación en el porta objetos  $c$  y la velocidad de propagación en el agua  $c_{ref}$ , tal y como se muestra a continuación:

$$\Delta TOF = \frac{l}{c} - \frac{l}{c_{ref}} = \frac{0.0009 \text{ m}}{6000 \frac{\text{m}}{\text{s}}} - \frac{0.0009 \text{ m}}{1480 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = -0.458 \mu\text{s}$$

En donde el signo negativo nos indica que la señal se adelanta y tiene un desplazamiento a la izquierda con respecto a la señal de referencia, además se aprecia que el valor obtenido se encuentra dentro del rango de valor obtenidos en las pruebas para 3 cm ( $0.45 \mu\text{s}$ ) y 6 cm ( $0.52 \mu\text{s}$ ), cabe mencionar que se esperaba que los valores obtenidos tanto para 3 cm y 6 cm fueran los mismos, sin embargo, considero que un error en la alineación de la muestra pudo ser el causante de esta pequeña variación.

### 3.2.2 Muestra: cobre objetos

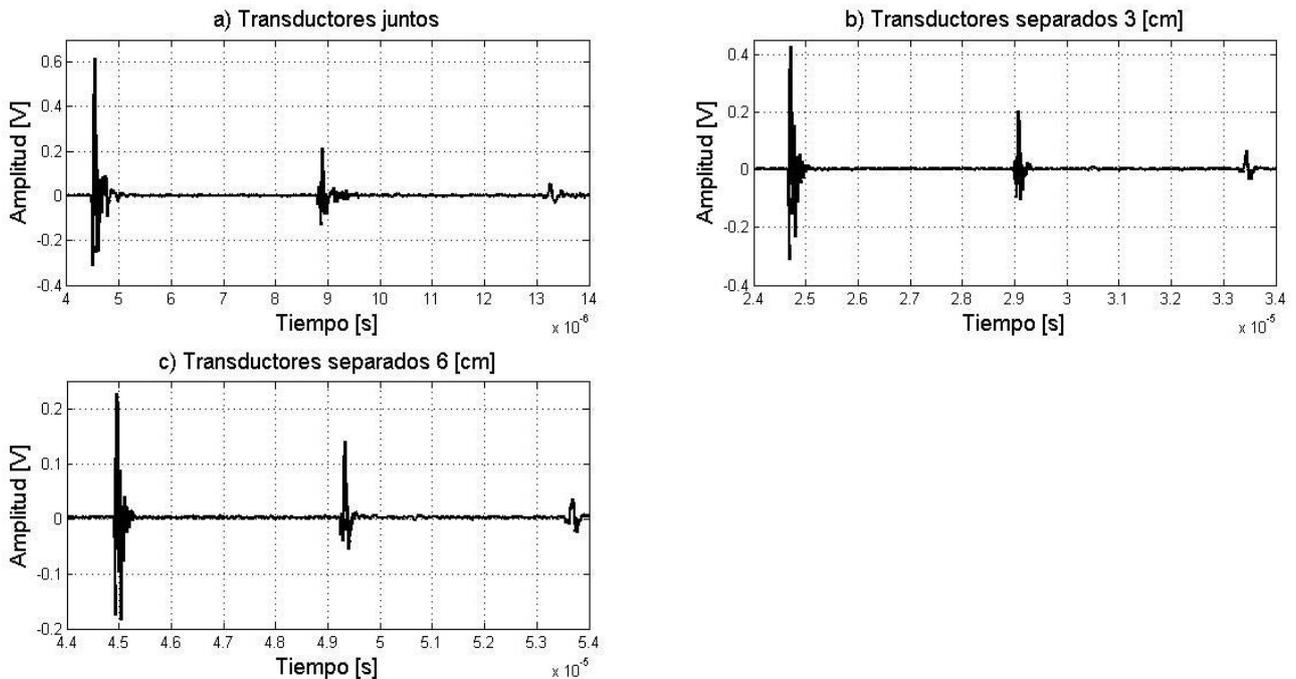


Figura 3.6. Señales de ultrasonido empleando la configuración en modo de transmisión, utilizando agua como medio de propagación. Note que la escala de los ejes son diferentes para todos los casos.

En la Figura 3.6, se muestra el comportamiento de las señales en el medio homogéneo (agua), que permanecen igual que cuando se utiliza el porta objetos, con un pulso inicial que tiene una amplitud que se va atenuando a medida que la señal recorre una mayor distancia y que se manifiesta en los rebotes que detecta el receptor cada  $4.32 \mu\text{s}$ , sin embargo, en el medio heterogéneo (ver Figura 3.7) la señal se adelanta y se atenúa en menor medida que el caso anterior al tener un cubre objetos compuesto por otro material (vidrio borosilicato), la velocidad de propagación del sonido en este material es de  $5660 \text{ m/s}$ , con una densidad de  $24.9 \text{ kg/m}^3$  y un espesor de  $0.13 \text{ mm}$ [9].

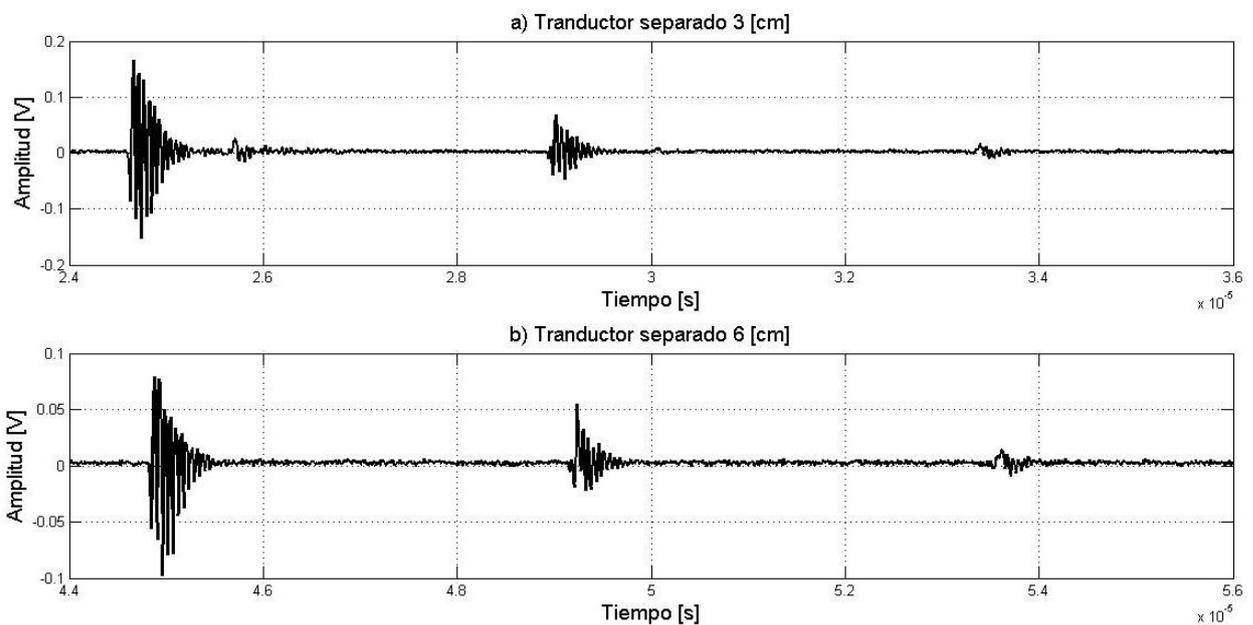


Figura 3.7. Señales de ultrasonido empleando la configuración en modo transmisión, con un medio de propagación heterogéneo (agua-cubre objetos- agua).

En la Figura 3.8, la señal con la mayor amplitud corresponde al medio de propagación homogéneo de  $0.76 V_{pp}$  y en el medio heterogéneo la señal se atenúa hasta una amplitud de  $0.25 V_{pp}$ , en este caso la forma de la señal en línea punteada no es igual a la señal en línea continua, al tener una caída más suave, de tal manera que da la impresión que el pulso se extiende. El adelanto que tiene la señal en el medio heterogéneo es de  $51 \text{ ns}$  con respecto al medio homogéneo.

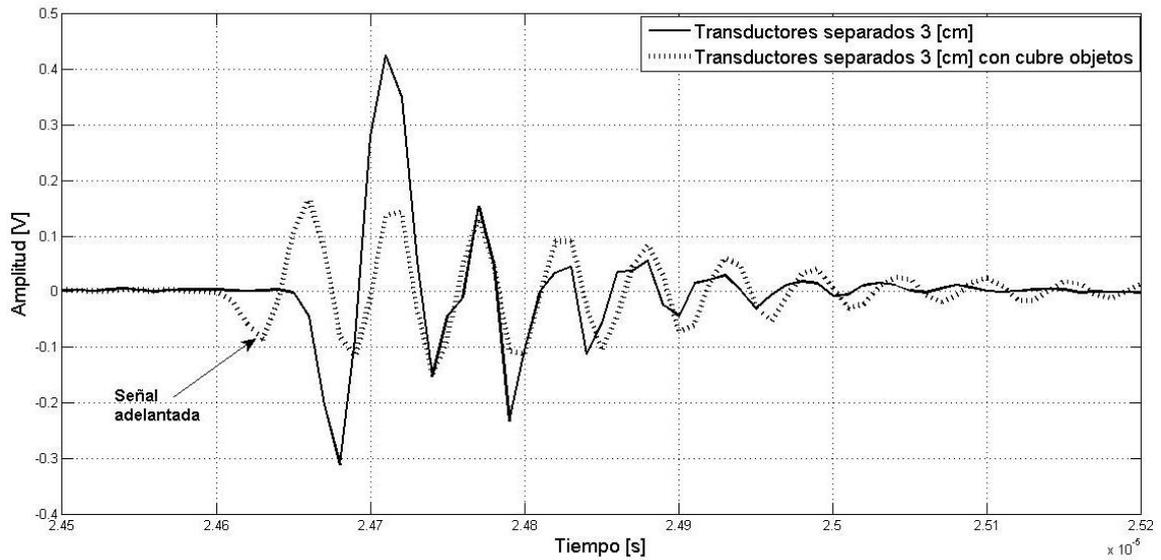


Figura 3.8. Transductores separados 3 cm, con cubre objetos y sin cubre objetos.

En la Figura 3.9, la señal en línea continua tiene una amplitud de 0.41 V<sub>pp</sub> para el medio homogéneo, en el medio heterogéneo la amplitud de la señal es menor con un valor de 0.14 V<sub>pp</sub>. Para este caso, el adelanto de la señal es de 78.5 ns entre la señal de línea punteada y la línea continua, esta diferencia de tiempo es mayor que en el caso de 3 cm, aquí suponemos que lo anterior se debe a una mala alineación de la muestra.

La forma de la señal correspondiente al cambio de medio tiene una caída suave y el voltaje prácticamente se mantiene con la misma amplitud, de tal forma que no se aprecia si existen reflexiones múltiples como en el porta objetos.

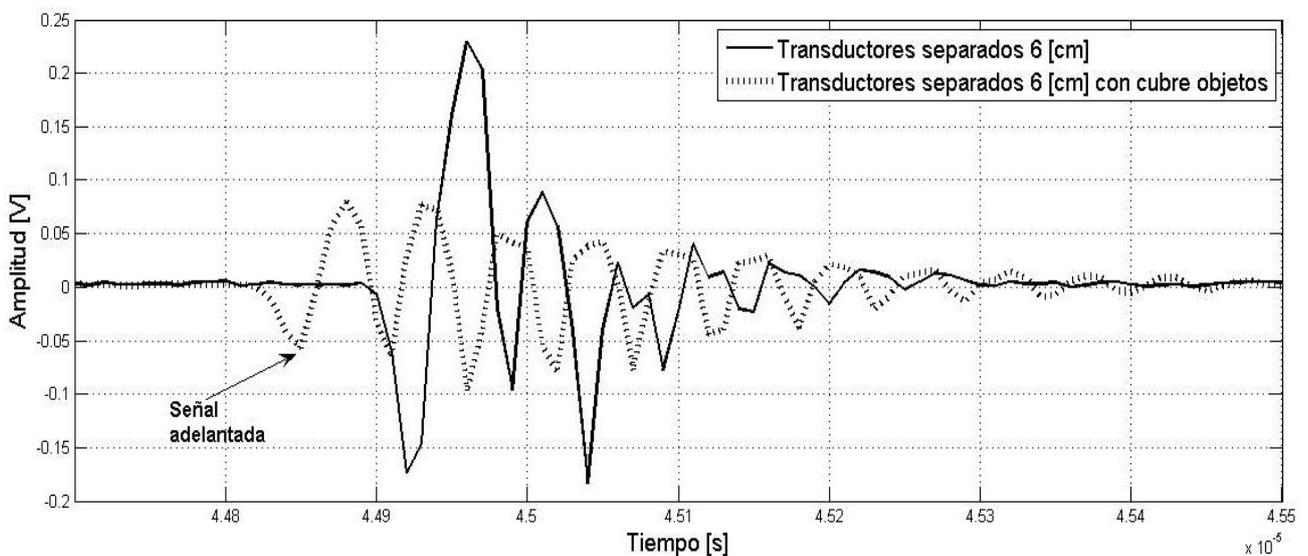


Figura 3.9. Transductores separados 6 cm, con cubre objetos y sin cubre objetos.

Al sustituir en la ecuación 2.3, la velocidad de propagación del ultrasonido en el agua  $c_{ref}$ , la velocidad de propagación del ultrasonido en el cobre objetos  $c$  y el espesor  $l$ , podemos determinar de manera teórica el valor del adelanto de la señal.

$$\Delta TOF = \frac{l}{c} - \frac{l}{c_{ref}} = \frac{0.00013 \text{ m}}{5600 \frac{\text{m}}{\text{s}}} - \frac{0.00013 \text{ m}}{1480 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = -64.62 \text{ ns}$$

El adelanto de la señal queda obtenido de manera teórica se encuentra dentro del intervalo de tiempo obtenido en la pruebas de 3 cm (51 ns) y 6 cm (78.5 ns), el signo negativo de la señal indica que el desplazamiento de la señal es a la izquierda de la señal de referencia (medio homogéneo), es decir, un adelanto.

### 3.2.3 Muestra: cápsula de agua

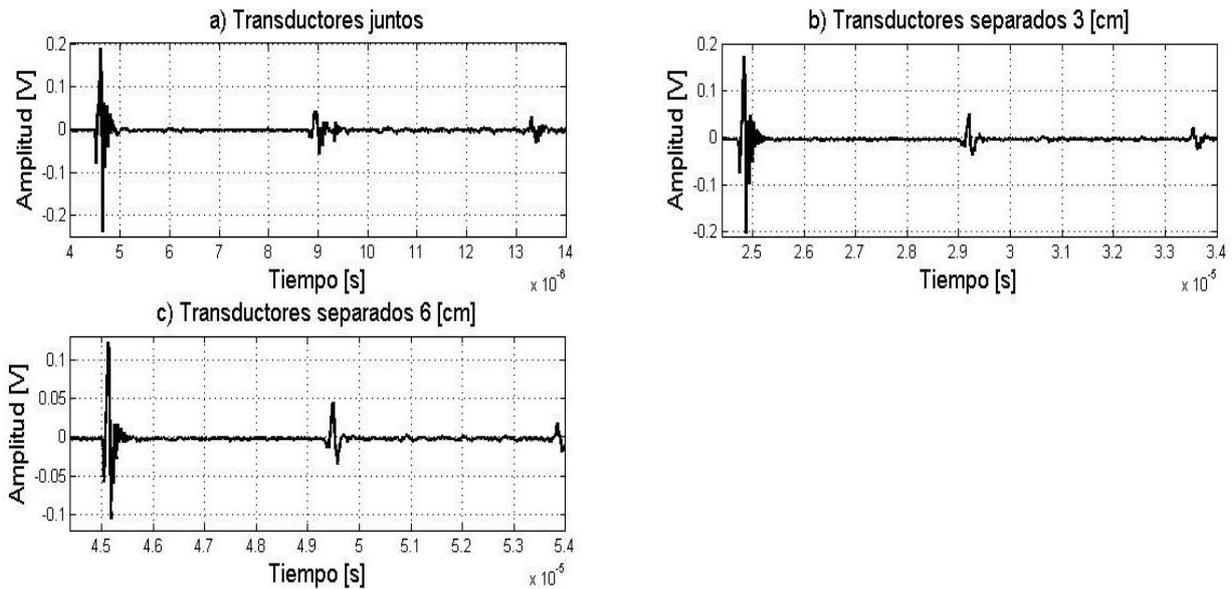


Figura 3.10. Señales de ultrasonido empleando la configuración en modo de transmisión, utilizando agua como medio de propagación. Note que la escala de los ejes es diferente en todos los casos

Se presentan los resultados al introducir como muestra una cápsula conformada por dos porta objetos que en su interior tienen un anillo lleno de agua, la configuración de las cápsulas se muestra en la figura 2.15.

En la Figura 3.10, se muestran las señales observadas en el osciloscopio, en donde se tiene agua como medio de propagación. Por otro lado en la Figura 3.11, el medio de propagación es heterogéneo, es decir, tiene una interface de agua-porta objetos-agua-porta objetos-agua.

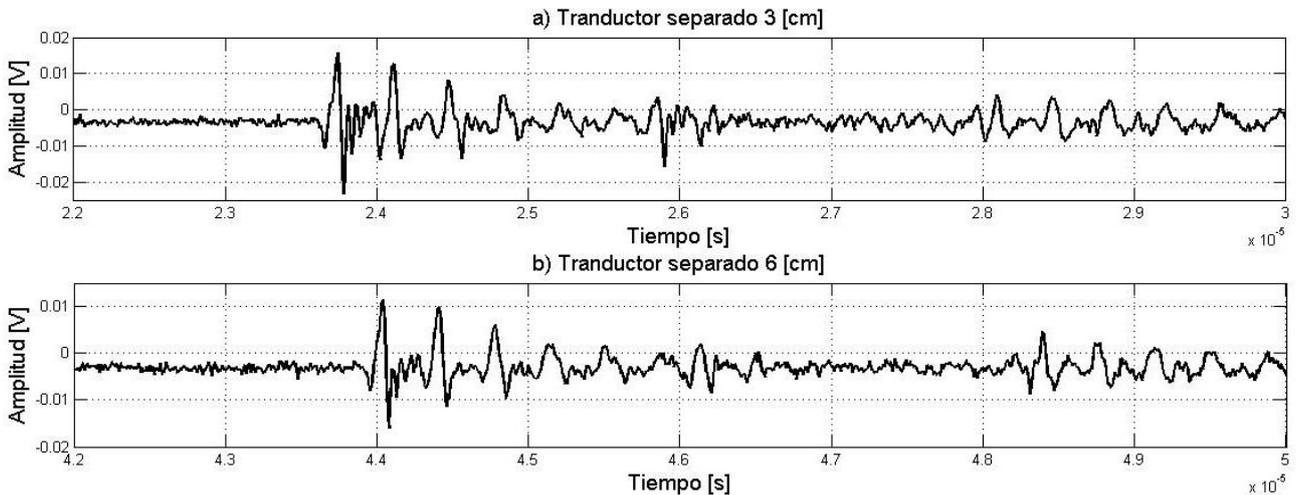


Figura 3.11. Señales de ultrasonido empleando la configuración en modo transmisión, con un medio de propagación heterogéneo (agua-porta objetos- agua-porta objetos-agua).

La amplitud de la señal al tener que atravesar dos porta objetos, se ve afectada en mayor medida, con una separación entre transductores de 3 cm, la amplitud de la señal de ultrasonido pasa de  $0.3728 V_{pp}$  (medio homogéneo) a una amplitud de  $0.0393 V_{pp}$  (medio heterogéneo). Por otro lado, cuando se tiene una separación entre transductores de 6 cm la amplitud de la señal pasa de  $0.2246 V_{pp}$  (medio homogéneo) a una amplitud de  $0.0285 V_{pp}$  (medio heterogéneo). Con la separación de 3 cm, la señal en línea punteada se adelanta  $1.0697 \mu s$  a la de línea continua tal y como se muestra en la Figura 3.12. Cuando la distancia es de 6 cm la señal se adelanta  $1.082 \mu s$  como se muestra en la Figura 3.13. En ambos casos las señales tienen múltiples reflexiones que se atenúan muy rápido al pasar de un medio a otro.

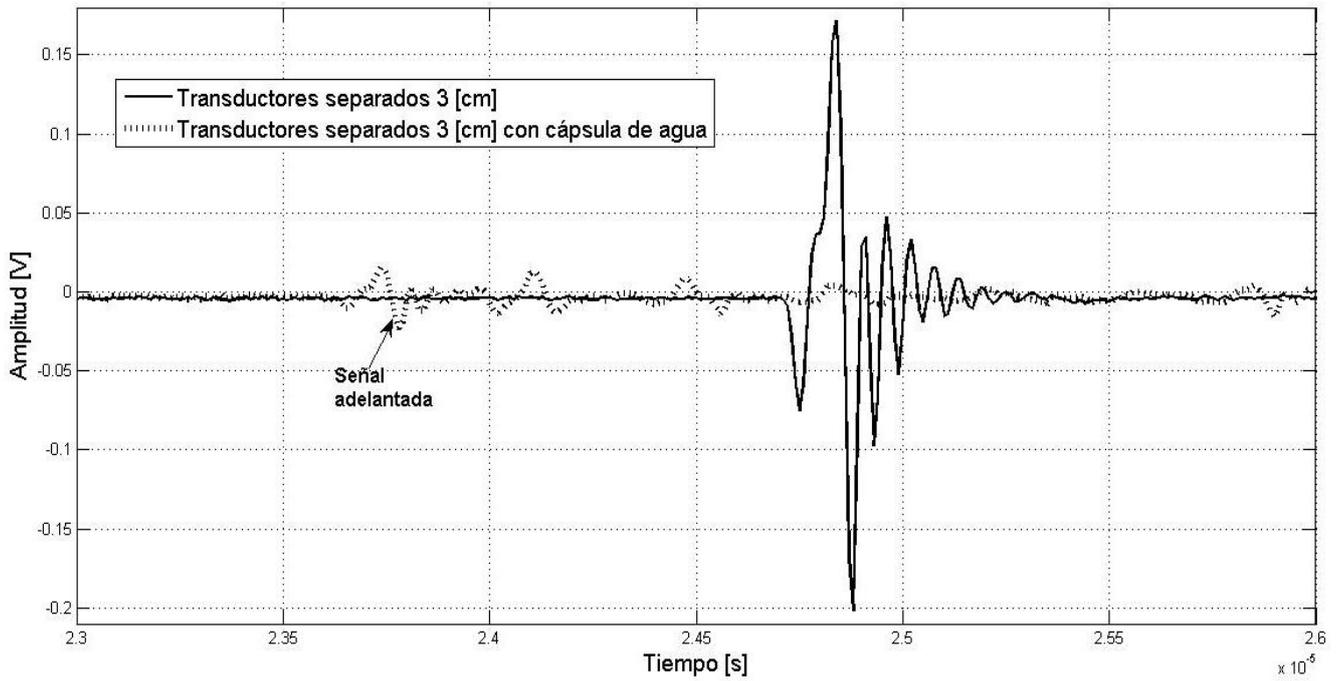


Figura 3.12. Transductores separados 3 cm, con y sin cápsula de agua.

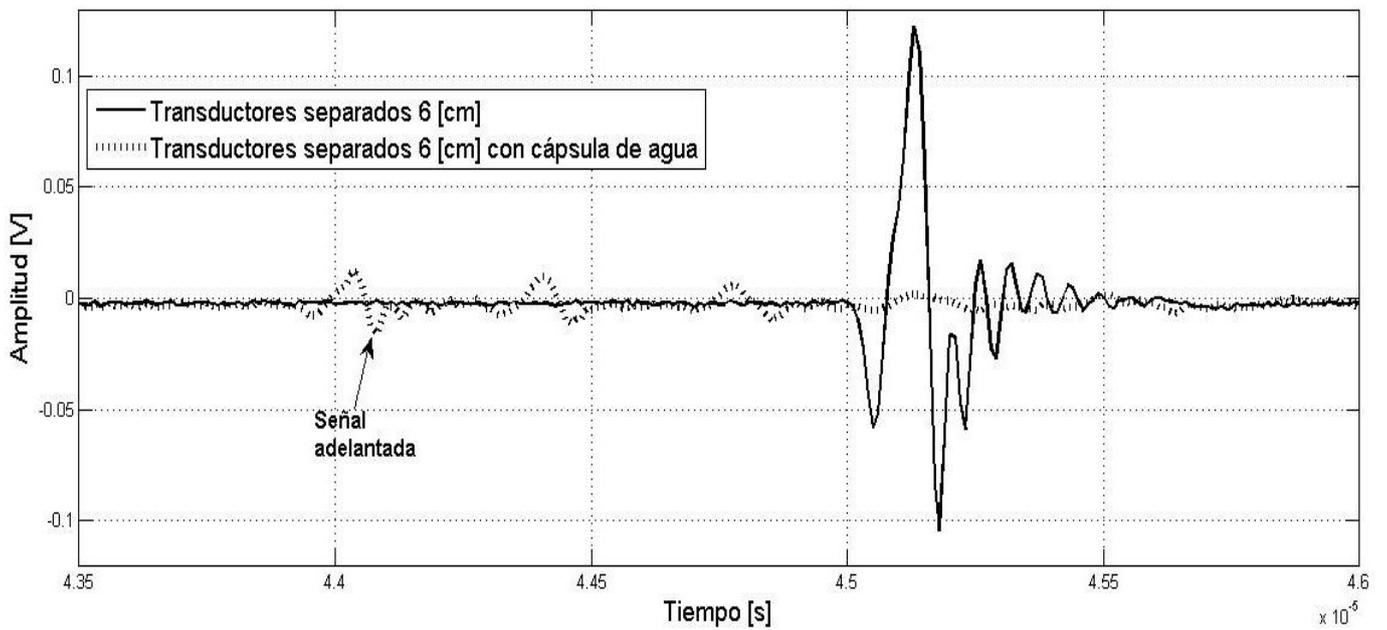


Figura 3.13. Transductores separados 6 cm, con y sin cápsula de agua.

### 3.2.4 Muestra: cápsula de acetona

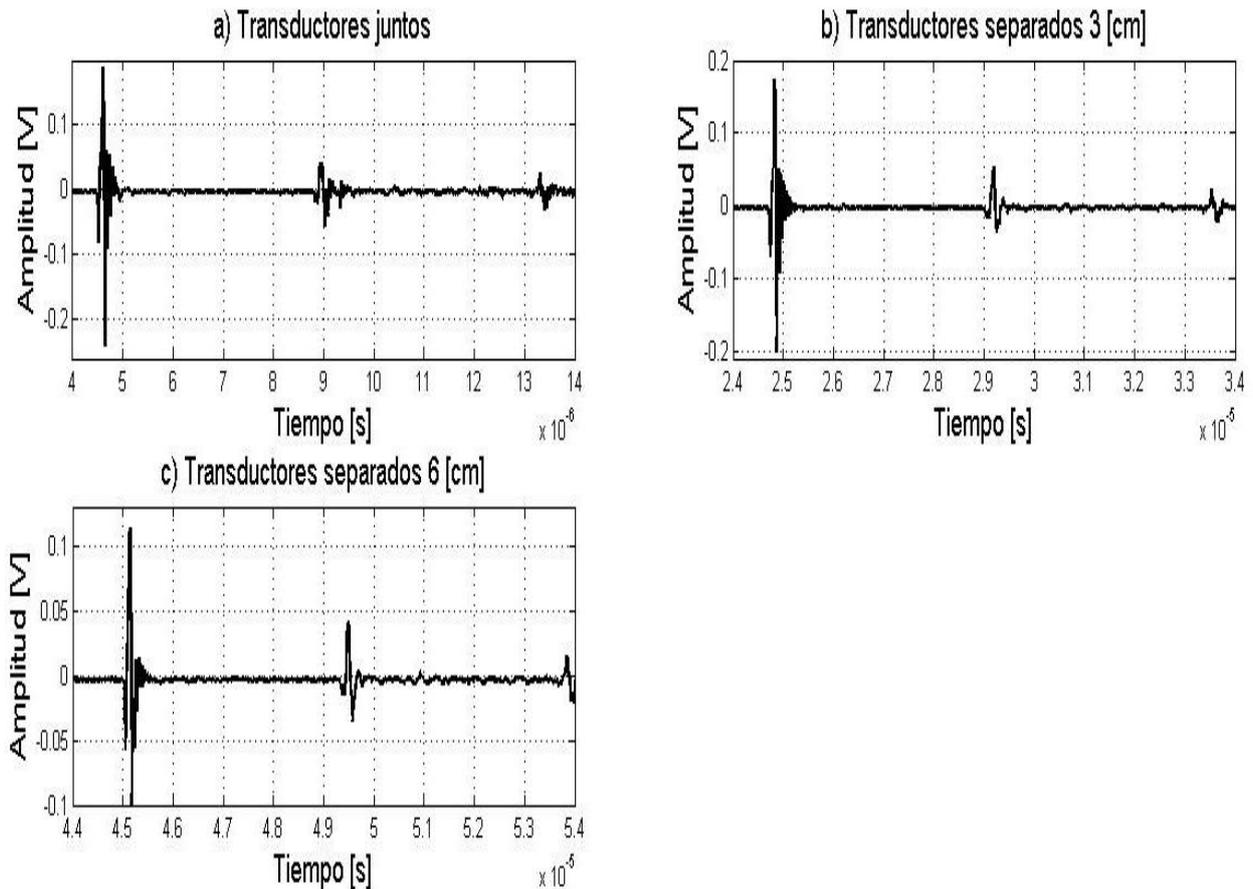


Figura 3.14. . Señales de ultrasonido empleando la configuración en modo de transmisión, utilizando agua como medio de propagación. Note que la escala de los ejes es diferente para todos los casos

En la Figura 3.14 se muestra las señales de ultrasonido cuando las ondas se propagan en agua con los transductores juntos, separados a una distancia de 3 cm y 6 cm. La Figura 3.15 describe la forma de las ondas para el caso cuando el pulso de ultrasonido pasa a través de los diferentes medios que son agua-porta objetos-acetona-porta objetos-agua. Con la finalidad de observar el comportamiento de la señal propagada, al pasar la señal a través de un medio, en donde la velocidad de propagación del sonido es mayor que a la del agua (porta objetos) y cuando es menor (acetona). La velocidad de propagación en el porta objetos es de 6000 m/s mientras en que en la acetona es 1174 m/s.

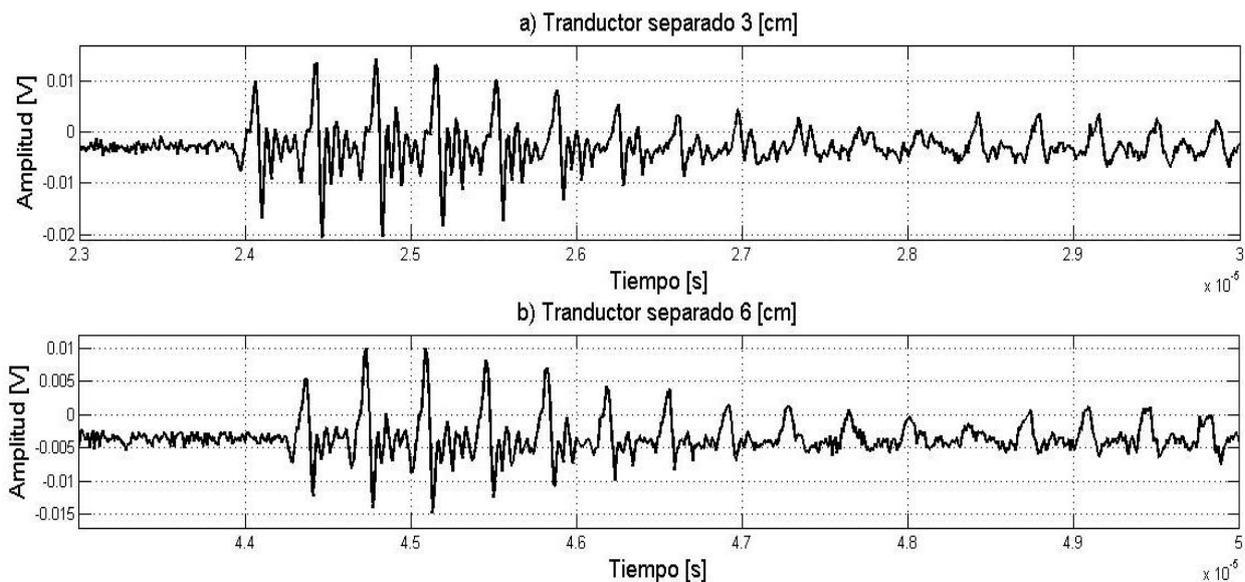


Figura 3.15. Señales de ultrasonido empleando la configuración en modo transmisión, con un medio de propagación heterogéneo (agua-porta objetos- acetona-porta objetos-agua).

Del análisis de las gráficas de las Figuras 3.16 y 3.17, determinamos que los voltajes de las señales, cuando los transductores están separados 3 cm son de  $0.3764 V_{pp}$  en el medio homogéneo y de  $0.028 V_{pp}$  en el medio heterogéneo; cuando la distancia es de 6 cm los voltajes de la señales son  $0.2147 V_{pp}$  para el medio homogéneo y de  $0.0208 V_{pp}$  para el medio heterogéneo. En el medio heterogéneo, la señal a pesar de ser de una magnitud pequeña, mantienen su valor en un tiempo mayor. La señal se adelanta  $0.7592 \mu s$  y  $0.762 \mu s$  con una separación entre transductores de 3 cm y 6 cm respectivamente.

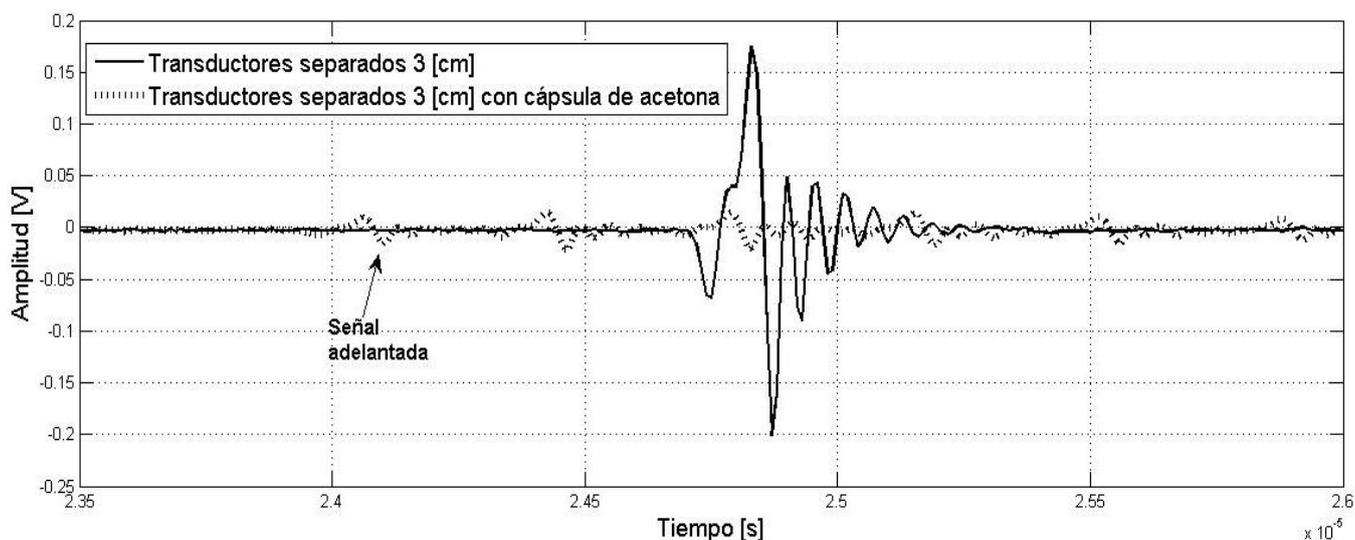


Figura 3.16. Transductores separados 3 cm, con y sin cápsula de acetona.

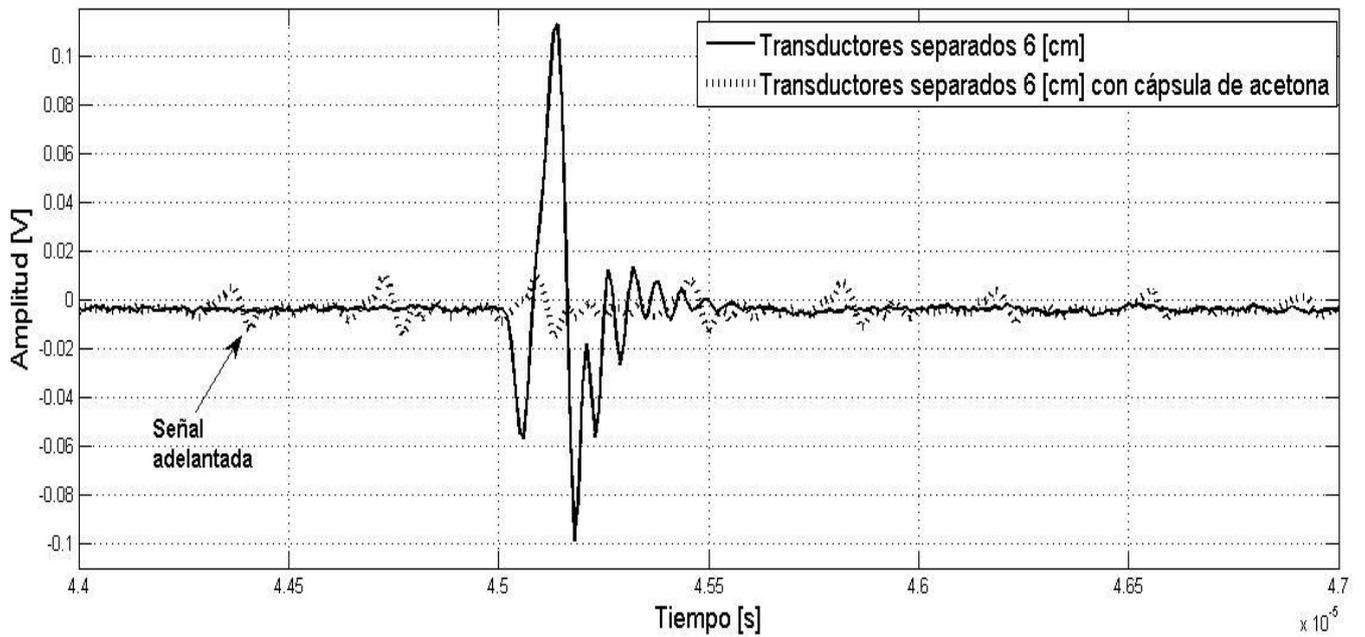


Figura 3.17. Transductores separados 6 cm, con y sin cápsula de acetona.

### 3.2.5 Muestra: cápsula de aceite

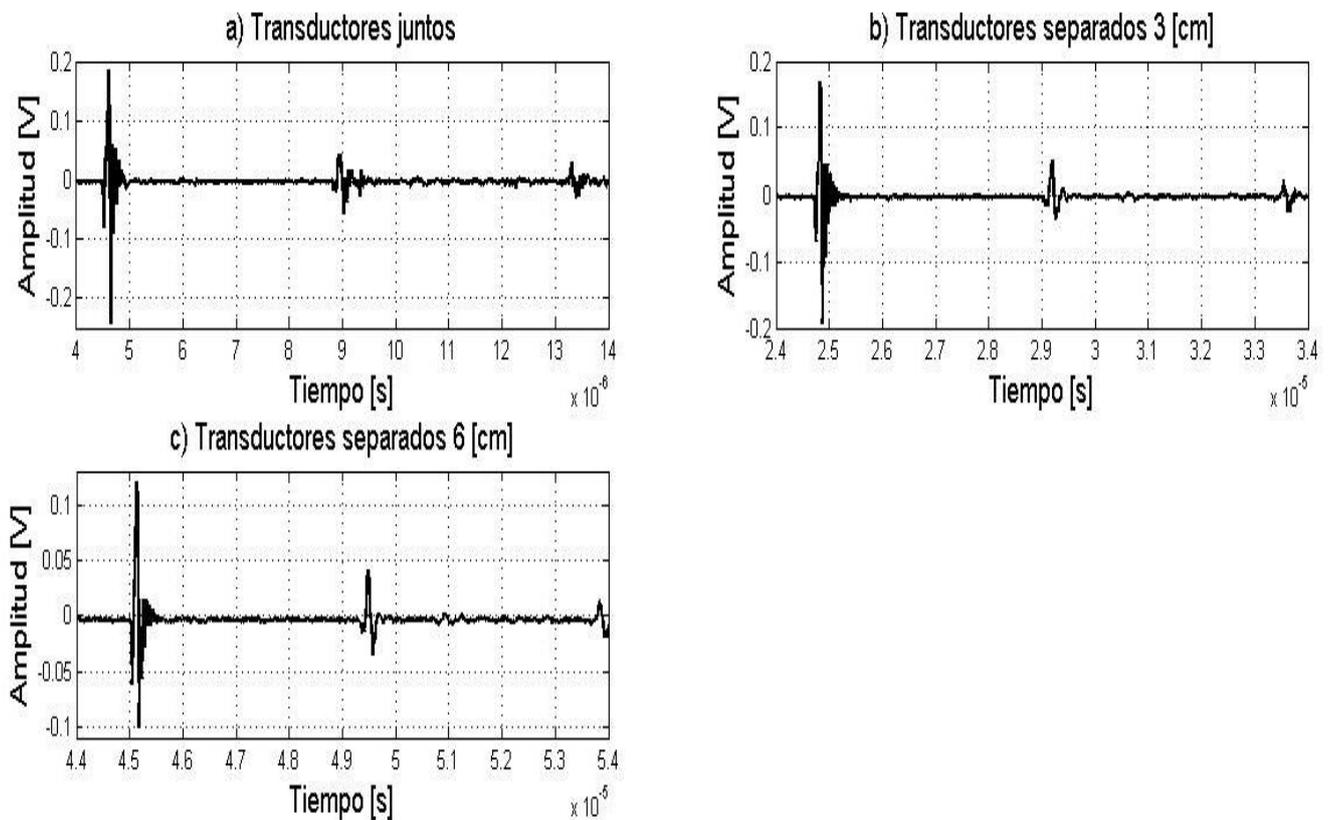


Figura 3.18. Señales de ultrasonido empleando la configuración en modo de transmisión, utilizando agua como medio de propagación.

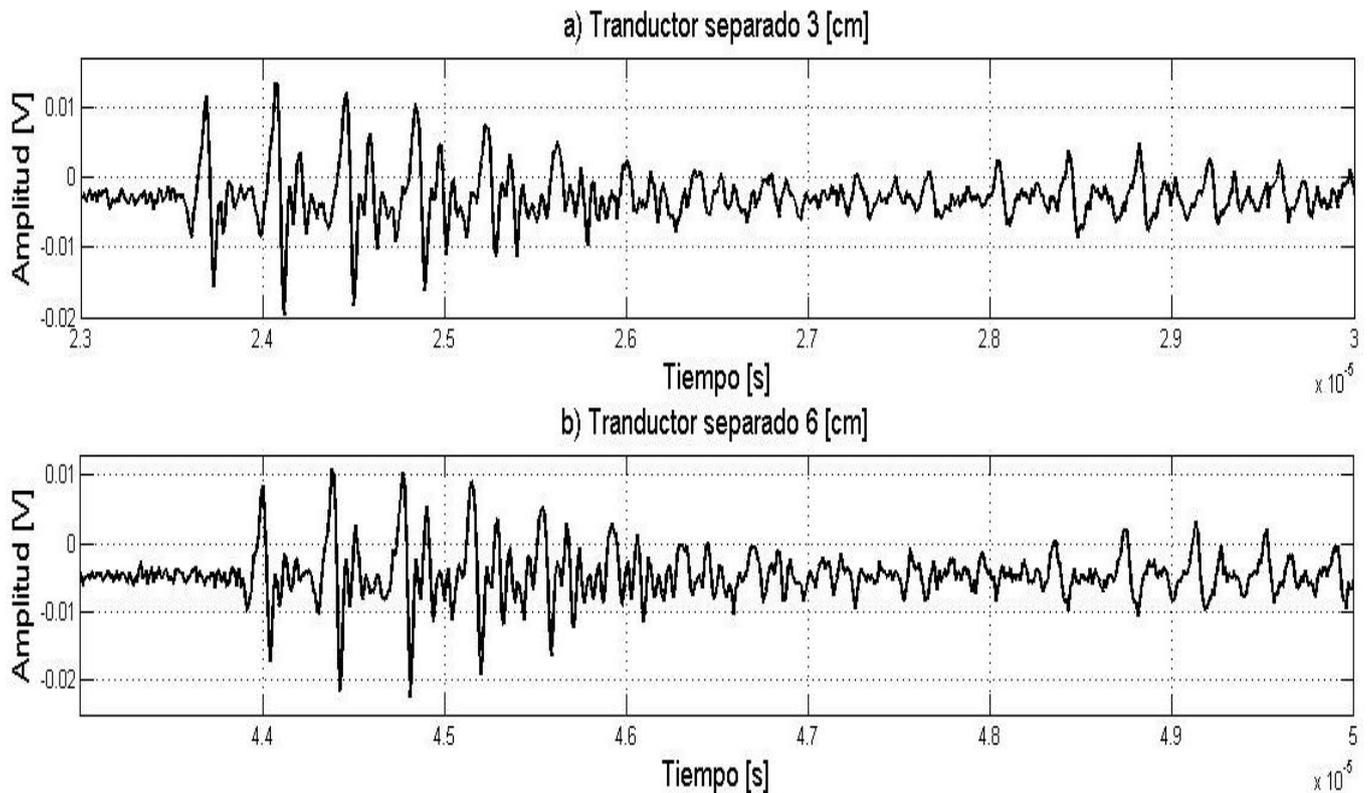


Figura 3.19. Señales de ultrasonido empleando la configuración en modo transmisión, con un medio de propagación heterogéneo (agua-porta objetos- aceite-porta objetos-agua).

Finalmente, para la configuración del medio heterogéneo se sumergió una cápsula de aceite, de tal forma que la señal atravesara agua-porta objetos- aceite-porta objetos-agua, las señales obtenidas se muestran en la Figura 3.19, cuando los transductores están separados 3 [cm] y 6 [cm].

Del análisis de las gráficas de las Figuras 3.20 y 3.21, determinamos que los voltajes de las señales cuando los transductores están separados 3 cm, son de  $0.3661 V_{pp}$  en el medio homogéneo y de  $0.0301 V_{pp}$  en el medio heterogéneo, cuando la distancias es de 6 cm los voltajes de la señales son  $0.2216 V_{pp}$  para el medio homogéneo y de  $0.027 V_{pp}$  para el medio heterogéneo. Las señales en el medio heterogéneo a pesar de tener una magnitud pequeña, mantienen su valor en un tiempo mayor.

La señal se adelanta  $1.1282 \mu s$  y  $1.1136 \mu s$  con una separación entre transductores de 3 cm y 6 cm respectivamente.

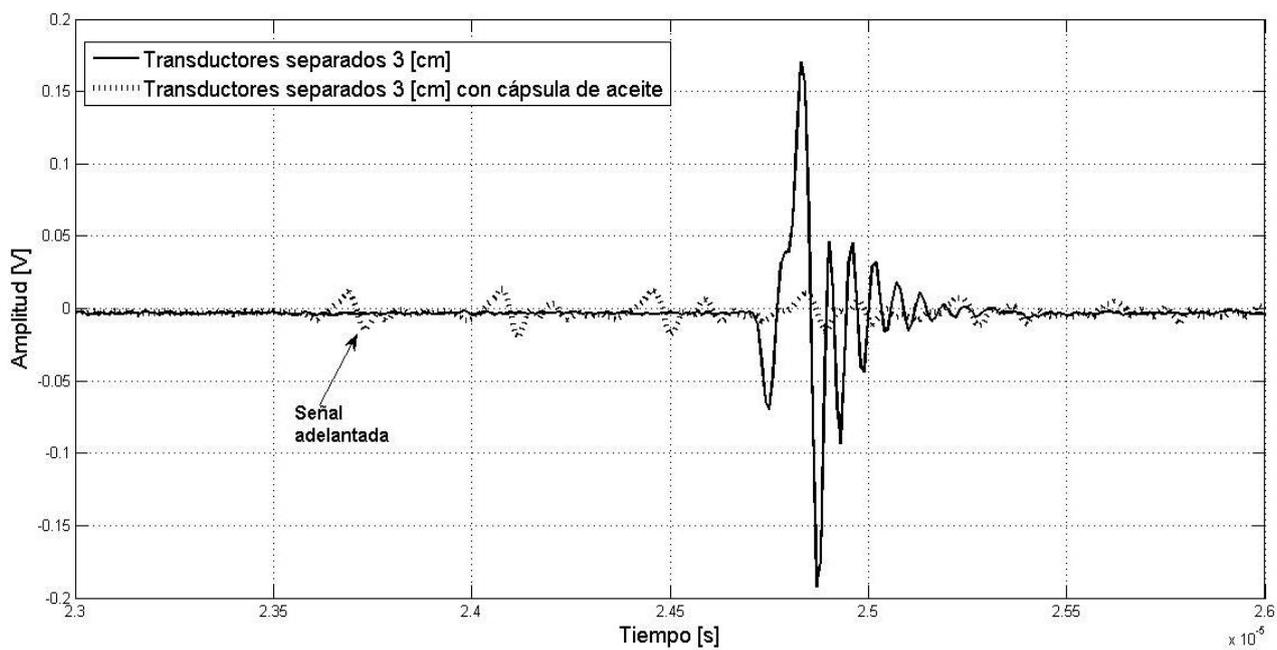


Figura 3.20. Transductores separados 3 cm, con y sin cápsula de aceite.

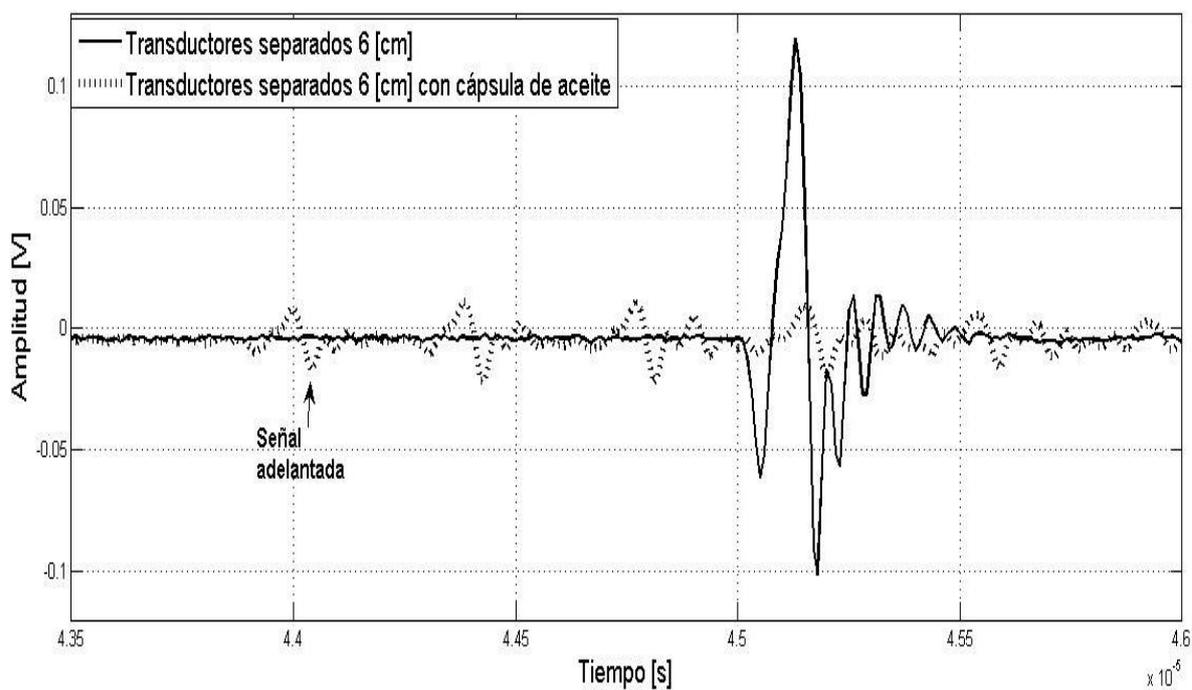


Figura 3.21. Transductores separados 6 cm, con y sin cápsula de aceite.

Lo anterior se resume en la tabla 3.3 para comparar los valores obtenidos en las pruebas para 3 cm y 6 cm al propagarse en un medio heterogéneo. Para una pieza homogénea, la intensidad recibida será equivalente a la emitida y por tanto el instrumento de medida marcará el 100 % de la intensidad emitida. En el caso de una pieza heterogénea, la propagación del ultrasonido se dificulta por la discontinuidad del material, resultando una reducción de la presión acústica y por tanto, una lectura menor en el aparato de medida [18].

En cuanto la amplitud de la señal de ultrasonido en el medio homogéneo, se observa que para el porta y cubre objetos tienen un valor similar, sin embargo, para las demás muestras cae a la mitad aproximadamente, esto se debe a que las pruebas con las cápsulas se realizaron otro día y al parecer no se logró alinear adecuadamente los transductores, demostrando que la alineación es un factor importante en la medición de la señales de ultrasonido.

| Muestra            | material        | voltaje de la señal en medio heterogéneo [V <sub>pp</sub> ] |        | adelanto de la señal [μs] |        |
|--------------------|-----------------|---|--------|---------------------------|--------|
|                    |                 | 3 [cm]  | 6 [cm] | 3 [cm]                    | 6 [cm] |
| Porta objetos      | Sodocálcico     | 0.28  | 0.14   | 0.45                      | 0.52   |
| Cubre objetos      | Borosilicato    | 0.25  | 0.14   | 0.051                     | 0.0785 |
| Cápsula de agua    | Agua            | 0.0393  | 0.0285 | 1.067                     | 1.082  |
| Cápsula de Acetona | Acetona         | 0.028   | 0.0208 | 0.7592                    | 0.762  |
| Cápsula de Aceite  | Aceite de oliva | 0.0301  | 0.027  | 1.1282                    | 1.1136 |

Tabla 3.3 Comparación de los resultados al pasar por un medio heterogéneo.

### 3.3 Conclusiones de capítulo

Como se mencionó en la parte teórica, el ultrasonido se ve afectado por las características del medio en donde se propaga, es por esta razón que fue importante el análisis de la comparación de las gráficas cuando se tiene un medio homogéneo a uno heterogéneo, ya que observamos que las ondas ultrasónicas

presentaban reflexiones múltiples, se atenúan, se adelantan o retrasan dependiendo de la muestra de referencia.

Además, se puede concluir que la configuración en modo pulso-eco utilizada nos permite localizar a qué distancia se encuentra un objeto (discontinuidad) de la fuente (transductor) en un medio homogéneo, ya que en esta modalidad el receptor capta los ecos de la señal de ultrasonido que son producidos por los objetos que se encuentran en su trayectoria. Mientras que la configuración en modo transmisión permite evaluar cómo se comporta la señal de ultrasonido al pasar por un medio heterogéneo, al verse afectado por cambios en el medio de propagación.

## Capítulo IV

### 4. Conclusiones generales

Se implementó un sistema de posicionamiento mecánico conformado por dos motores a pasos que se desplazan en el plano XY, los cuales nos permiten desplazar el transductor a pequeñas distancias ( $2.5 \mu\text{m}$  por paso). Un aspecto importante de este sistema fue la validación de que los desplazamientos del motor fueran los más acertados a los valores reales de desplazamiento, es por eso, que a través del método de la obtención del tiempo de vuelo de la señal de ultrasonido se puede obtener la distancia que existe entre el transmisor-transmisor y el transmisor-receptor. Cabe mencionar que para tener una buena lectura del tiempo de vuelo de la señal, primero se deben conocer las características de propagación del ultrasonido en el medio.

En nuestro caso, la distancia mínima que pudimos determinar al emplear ondas de ultrasonido fue de  $25 \mu\text{m}$  (10 pasos del motor) verificando que los desplazamientos eran muy cercanos a los reales. Cuando se realizó para distancias menores a  $25 \mu\text{m}$  se obtienen valores que varían entre una determinada cantidad de pasos a otra, debido a que los soportes en donde se sujetan los motores se ven afectados por vibraciones por lo largo que son éstos. Para este trabajo se emplearon transductores piezoeléctricos PZT para la generación y detección de ondas de ultrasonido, al permitirnos trabajar en un amplio rango de frecuencias para la caracterización de las muestras utilizadas en los experimentos. Para la detección de los campos de ultrasonido se consideró que era mejor utilizar un transductor PVDF al tener una impedancia acústica similar a la del agua, sin embargo, en esos momentos no funcionaba el hidrófono destinado para ese fin por lo que se sustituyó por un PZT.

Las configuraciones utilizadas en el desarrollo de esta tesis fueron pulso-eco y transmisión; la primera nos permitió conocer la localización en un medio homogéneo entre las muestras y el emisor, mediante la recepción de los ecos producidos por los objetos que se encuentran en la trayectoria de la señal de ultrasonido. Por otro lado, el modo transmisión nos permitió observar el

comportamiento de la señal de ultrasonido al pasar por un medio heterogéneo, al verse afectado por cambios en el medio de propagación.

Ahora, al contar con la experiencia de este trabajo podemos destacar varios puntos a considerar para el sensor que se pretende elaborar (hidrófono basado en fibra óptica), por ejemplo dado que se va a tener un transductor exclusivo para detectar los campos de ultrasonido (hidrófono) la configuración empleada deberá ser la de transmisión y se deberá tener suma precaución en el sistema de alineación, ya que la amplitud de la señal se ve afectada si el haz de ultrasonido no incide normal a la superficie de contacto.

## Referencias:

1. A. Vargas, L. Amescua, A. Bernal and C. Pineda, "Principios Físicos básicos del ultrasonido, sonoanatomía del sistema musculo esquelético y artefactos ecográficos," *Acta Ortopédica Mexicana*, vol. 22, no.6, pp. 361-373, Nov.-Dic, 2008.
2. J. David and N. Cheeke, *Fundamentals and Applications of Ultrasonics Waves*, CRC press, 2002.
3. A Belendez, "Acústica," en *Acústica, Fluidos y Termodinámica*, Politécnica, Universidad de Alicante, 1992, pp. 2-28.
4. R. C. Preston, *Output Measurements for Medical Ultrasound*, Springer-Verlag, 1991.
5. E. Gómez de León,"Modos de vibración o Tipos de ondas," en *END. Ultrasonidos. Nivel II*, Fundación confemetal, pp 23-46.
6. D. Ensminger and L. J. Bond. *Ultrasonics Fundamentals, Technologies, and Applications*, 3rd. ed., CRC press, 2012.
7. J. T. Bushberg, et al., "Ultrasound," in *The Essential Physics of Medical Imaging*, 2nd. Ed., Lippincott Williams & Wilkins,2002, pp.469-553.
8. RF Farr and PJ Allisy-Roberts,"Imaging with Ultrasound," *Physics for medical imaging*, Saunders, 2002,pp.183-214.
9. Tablas de propiedades acústicas, Onda Corporation, [www.ondacorp.com](http://www.ondacorp.com), 2014.
10. C.H. Sherman and J. L. Butler, *Transducers and Arrays for Underwater Sound*, Springer, 2007.
11. P. Morris, "A Fabry-Perot fibre-optic hydrophone for the characterization of ultrasound fields," PhD Thesis, University of London, 2008.
12. L. Doležal, C. Kollmann, et al.,"Automated measurements for ultrasonic QA" in *Efforts of Ultrasound in Medicine*, Grafia Nova, 2012,pp.89-99.
13. P. N. T. Wells, "Ultrasonic imaging of the human body," *Rep. Prog. Phys.*,vol. 62,no.5, pp. 671-722, 1999.
14. *Curso de ultrasonido básico*, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela, pp. 88-89.
15. DPR300 Pulser/Receiver Operator Manual, Imaginant Inc., Rochester, New York ,2011.
16. P. Laugier and G. Haïat,"Introduction to the Physics of Ultrasound," in *Bone Quantitative Ultrasound*, Springer, 2011, pp.29-46.
17. C. Rimoldi y L. Mundo, *Ensayo No Destructivo por Método de Ultrasonido*, Facultad de Ingeniería, Departamento de Aeronáutica, pp.19-26.
18. R. Huete, P. Rubio y C. Rodriguez, "Aplicación de los métodos de ultrasonidos a la verificación de materiales de construcción", *Revista de Edificación*, no.13, pp. 9-22, marzo 1993.

## Apéndice A. Equipo Utilizado

### High Frequency Transducers



High Frequency Transducers offer frequency ranges from 30MHz to 150MHz. Applications include acoustic microscopy, flaw detection, and characterization of solder bumps in flip-chips in the microelectronics industry, high resolution thickness of meals down to 0.001" (0.0254mm), and high resolution surface wave imaging.

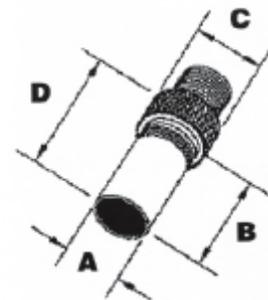
#### Advantages:

- Broadband, highly damped signals for flaw detection of defects as small as 0.001" (0.0254mm)
- Extremely short wavelengths for thickness gauging
- Available in both Contact and Immersion Delay Styles
- Immersion Transducers available with optically ground lenses

### High Frequency Standard Immersion Case Style

High Frequency Standard Immersion Case Style Transducers are available in frequencies from 20MHz to 100MHz. These transducers are all provided with axial UHF connectors for support and either a side-mount or axial-mount microdot for the electrical connector. In addition, they come with an internal fuse silica delay line and are available flat or focused. Epoxy lenses are used for frequencies up to 30MHz. Custom transducers are available above 30MHz and are offered with optically ground lenses.

| PART NUMBER | FREQUENCY (MHz) | SIZE INCHES (mm) | DELAY (µS) | FOCAL LENGTH INCHES (mm) |
|-------------|-----------------|------------------|------------|--------------------------|
| VF 401      | 20.0            | 0.25 (6.35)      | 4.25       | flat                     |
| VF 402      | 20.0            | 0.25 (6.35)      | 2.5        | 0.75 (19.05)             |
| VF 403      | 20.0            | 0.25 (6.35)      | 4.25       | 1.25 (31.75)             |
| VF 404      | 20.0            | 0.25 (6.35)      | 4.25       | 2.0 (50.8)               |
| VF 405      | 30.0            | 0.25 (6.35)      | 4.25       | flat                     |
| VF 406      | 30.0            | 0.25 (6.35)      | 2.5        | 0.75 (19.05)             |
| VF 407      | 30.0            | 0.25 (6.35)      | 4.25       | 1.25 (31.75)             |
| VF 408      | 30.0            | 0.25 (6.35)      | 4.25       | 2.0 (50.8)               |
| VF 409      | 50.0            | 0.25 (6.35)      | 4.25       | flat                     |
| VF 410      | 50.0            | 0.25 (6.35)      | 2.5        | 0.75 (19.05)             |
| VF 411      | 50.0            | 0.25 (6.35)      | 4.25       | 1.25 (31.75)             |
| VF 412      | 50.0            | 0.25 (6.35)      | 2.5        | 0.5 (12.7)               |
| VF 413      | 75.0            | 0.25 (6.35)      | 2.5        | 0.5 (12.7)               |
| VF 414      | 100.0           | 0.25 (6.35)      | 2.5        | 0.5 (12.7)               |



| DIMENSIONS INCHES (mm) |             |              |               |
|------------------------|-------------|--------------|---------------|
| A                      | B           | C            | D             |
| 0.62 (15.748)          | 1.2 (30.48) | 0.75 (15.24) | 1.56 (39.624) |



**Transducer Performance** Part#:VF401  
 Conforms to NIST and ASTM E-1085 Standard Serial#: 1306124

**TRANSDUCER DETAILS**

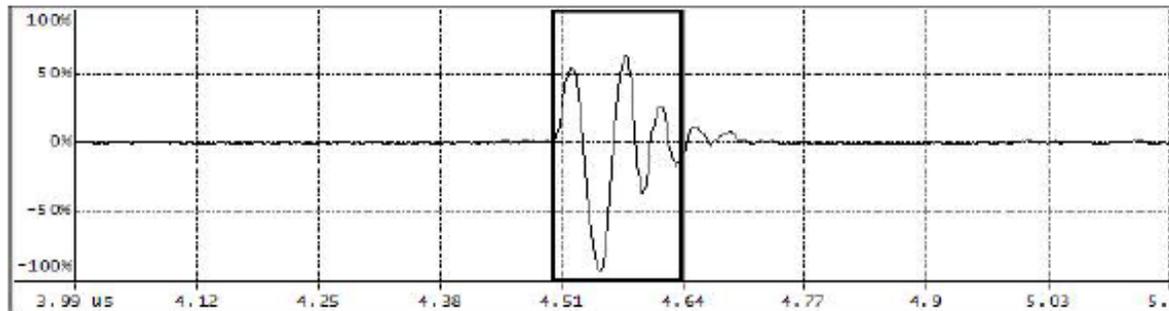
Frequency: 20 MHz  
 Size: 0.2 in  
 Focus: FLAT  
 Connector: MicroDot  
 Description: Custom HF

**TEST SETUP**

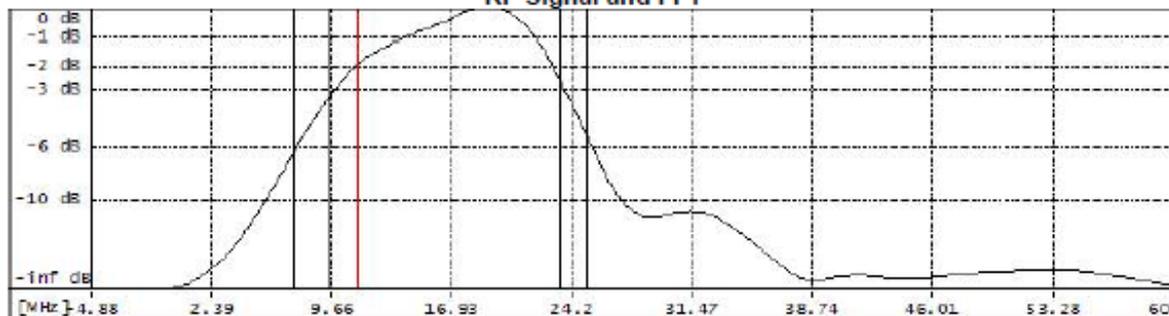
Mode: Pulse-Echo  
 Target: End of Delay  
 Cable: RG174-9in  
 Software: ODIS 3.10.12

**PULSER/RECEIVER**

Model: DPR500 S/N: DPR500  
 Damp: 44 Ohms Phase: N/A  
 Energy: Low Transmit (Vpp):  
 Attenuation: N/A (dB)  
 P/E Gain: 0 dB P/C Gain: 0 (dB)  
 HPF: 5 MHz LPF: 50 MHz



RF Signal and FFT



**RESULTS**

|                                  |                              |                                    |
|----------------------------------|------------------------------|------------------------------------|
| Peak Freq (MHz): <b>19.531</b>   | -6db BW (MHz): <b>17.900</b> | Receive Voltage (Vpp): <b>0.80</b> |
| Center Freq (MHz): <b>16.473</b> | -6db BW (%): <b>108.663</b>  | %FSH: <b>80.08</b>                 |
| -3dB Hi(MHz): <b>23.772</b>      | -6db Hi (MHz): <b>25.423</b> | Sensitivity(dB): <b>Infinite</b>   |
| -3dB Lo(MHz): <b>9.781</b>       | -6db Lo (MHz): <b>7.523</b>  | Waveform Duration: <b>0.14</b>     |

**COMMENTS**

RP-12

Inspected by: \_\_\_\_\_

*Valdemar Krajcaricki*

Date:

6/25/2013



**Transducer Performance** Part#:VF409  
 Conforms to NIST and ASTM E-1085 Standard Serial#: 1307076

**TRANSDUCER DETAILS**

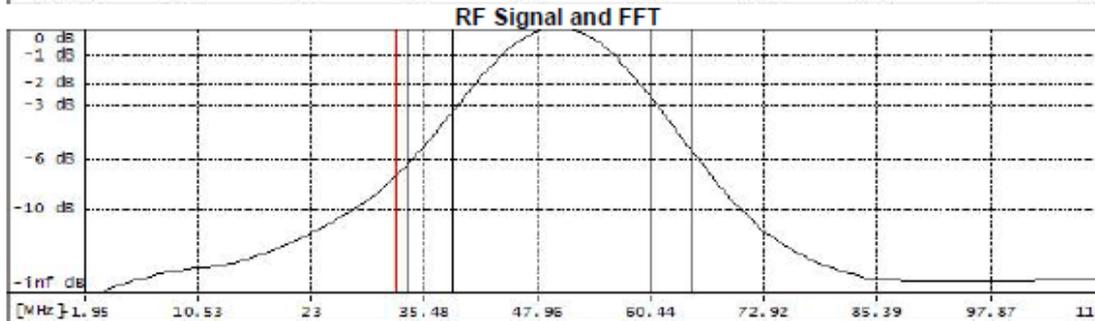
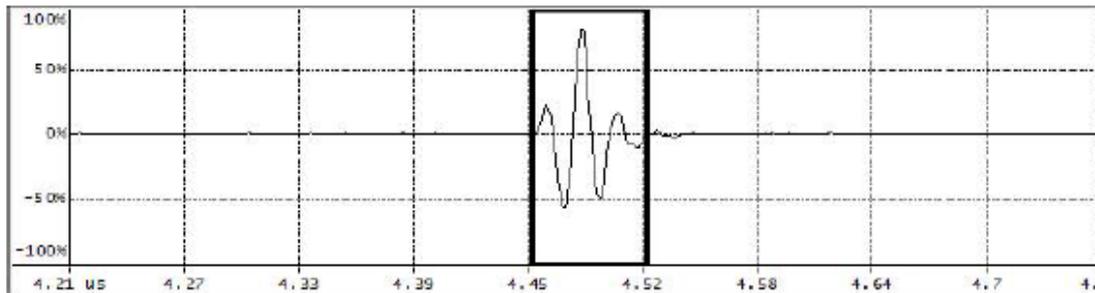
Frequency: 50 MHz  
 Size: 0.2 in  
 Focus: FLAT  
 Connector: MicroDot  
 Description: Custom HF

**TEST SETUP**

Mode: Pulse-Echo  
 Target: Front Surface  
 Cable: RG174-9in  
 Software:ODIS 3.10.12

**PULSER/RECEIVER**

Model: DPR500 S/N: DPR500  
 Damp: 50 Ohms Phase: N/A  
 Energy: Low Transmit (Vpp):  
 Attenuation: N/A (dB)  
 P/E Gain: 0 dB P/C Gain: 0 (dB)  
 HPF: 5 MHz LPF: 500 MHz



**RESULTS**

|                                  |                              |                                    |
|----------------------------------|------------------------------|------------------------------------|
| Peak Freq (MHz): <b>49.805</b>   | -6db BW (MHz): <b>31.653</b> | Receive Voltage (Vpp): <b>0.70</b> |
| Center Freq (MHz): <b>49.892</b> | -6db BW (%): <b>63.443</b>   | %FSH: <b>70.31</b>                 |
| -3dB Hi(MHz): <b>61.182</b>      | -6db Hi (MHz): <b>65.718</b> | Sensitivity(dB): <b>Infinite</b>   |
| -3dB Lo(MHz): <b>39.065</b>      | -6db Lo (MHz): <b>34.065</b> | Waveform Duration: <b>0.06</b>     |

**COMMENTS**

RP-H4B SN: PCU0025 2361-5123

Inspected by: \_\_\_\_\_  
*Valdemar Kojanowski*

Date:  
 7/3/2013

# JSR

# DPR300

## Ultrasonic Pulser/Receiver



- 35 MHz receiver BW (50 MHz option available)
- Noise level of 49  $\mu\text{Vp-p}$  input referred @ 35 MHz BW
- User adjustable pulse amplitude up to 475V (900V pulse amplitude option available)
- 16 damping values
- Selectable high and low pass filter settings (6 each)
- Selectable pulser energy and impedance
- 80 dB receiver gain range
- Windows-based control program and a Windows SDK are provided

The DPR300 is a computer controlled ultrasonic pulser/receiver with an extremely low noise receiver. Instrument controls include receiver gain, high and lowpass filter cutoff frequency selection, pulse energy, pulse amplitude, pulser impedance, damping level, pulse-echo or through transmission mode select, pulse repetition rate, and pulser trigger source select. A Manual Control option is available.

The DPR300 is designed for exacting applications. The rapid-recovery receiver is fully shielded from electromagnetic noise and interference to ensure a high signal to noise ratio. In addition, the pulser impedance, pulse energy, and pulse amplitude may be individually adjusted to optimize the excitation pulse for a specific application or transducer.

The DPR300 includes a Windows-based software control program to enable immediate usage in your application. Multiple DPR300's, and other JSR Ultrasonics instruments can be controlled from one computer using a hardware daisy chain interconnection scheme.

The Windows-based JSR Control Panel application and an SDK are provided to enable rapid development of custom software.

Areas of application include computer-controlled imaging and measurement systems, NDE systems, research and development, materials analysis and inspection, transducer evaluation, and exacting low-noise measurement systems.

**JSR**  **Ultrasonics**

# DPR300 Specifications

## Pulser

**Pulse Type** Negative spike pulse.

**Initial Transition (Fall Time)** <5 ns (10-90%) typical.

**Pulse Amplitude** Variable from 100V to 475V maximum. Amplitude depends on Energy, Damping, Amplitude, and Impedance control settings. 900V Amplitude option available.

**Pulser Energy** Selectable in 4 steps.

**Pulse Impedance** High or Low, user-selectable.

**Pulse Duration** Typically 10 - 70 ns FWHM for 50  $\Omega$  load. Function of the Energy, Impedance, and Damping settings.

**Damping** 16 Damping settings: 24.6, 26.3, 28.1, 30.3, 32.7, 35.7, 39.2, 43.5, 48.7, 55.6, 64.5, 76.9, 95.2, 125, 182, 333  $\Omega$ .

**Mode** Pulse-echo or through transmission. User-selectable.

**Through Trans. Isolation** Typically 80 dB at 10 MHz.

**Pulser Repetition Rate** Internal: 100 - 5 KHz, External: 0 - 5 KHz, Internal oscillator frequency user-selectable in 16 steps.

**Sync Output** Maximum +5V,  $t_r < 30$  ns,  $t_w = 200$  ns. min., TTL and CMOS compatible.

**Pulse Trigger Source** Internal oscillator and external source. User-selectable.

**External Trigger Input** 3 - 5 V positive going pulse. Triggering will occur on leading edge. TTL and CMOS compatible.

## Receiver

**Gain** -13 to 66 dB in 1 dB steps

**Phase** 0° (noninverting)

**Input Impedance** 500  $\Omega$  (through transmission)

**Bandwidth** .001 - 35 MHz (-3 dB)  
.001 - 50 MHz (-3 dB) bandwidth option available.

**High Pass Filter** 1.0, 2.5, 5.0, 7.5, 12.5 MHz.

**Low Pass Filter** 3, 7.5, 10, 15, 22.5 (35 MHz BW) or 5, 10, 15, 22.5, 35 (50 MHz BW)

**Noise** Typically 49  $\mu$ Vp-p input referred (60 dB gain, 35 MHz BW). Typically 59  $\mu$ Vp-p input referred (60 dB gain, 50 MHz BW).

**Output Impedance** 50  $\Omega$  Out-

## Computer

**Computer Interface** Bi-directional communication via RS-232 serial link using RJ45 type 8-conductor cable. 6' cable length standard. Other lengths available.

**Software** The Windows-based JSR Control Panel application and a Windows SDK are provided for custom application development.

## Miscellaneous

**Power** 100/120/220/240 VAC, 50/60 Hz, 30 W

**Dimensions** 8.5" W x 3.5" H x 12" D

**Weight** 10 lbs. (4.54 Kg)

© 2000, JSR Ultrasonics, DPR 300  
Note: Specifications are typical, at 25° C.  
Specifications subject to change without notice.

**JSR**  **Ultrasonics**

3800 Monroe Avenue, Pittsford, NY 14534, USA  
Tel: (716) 264-0480 • Fax: (716) 264-9642  
www.jsrultrasonics.com • E-mail: sales@jsrultrasonics.com

# Digital Phosphor Oscilloscopes

## TDS3000C Series Datasheet



The TDS3000C Series provides you with the performance you need at a price you can afford. Bandwidths range from 100 MHz to 500 MHz, with up to 5 GS/s sample rates for accurate representation of your signal.

### Key performance specifications

- 100 MHz, 300 MHz, and 500 MHz bandwidth models
- 2 or 4 analog channel models
- Sample rates up to 5 GS/s real time on all channels
- 10k record length on all channels
- 3,600 wfms/s continuous waveform capture rate
- Suite of advanced triggers

### Key features

- Front-panel USB host port for easy storage and transfer of measurement data
- 25 automatic measurements
- FFT standard
- Multiple language user interface
- WaveAlert® automatic waveform anomaly detection
- TekProbe® interface supports active, differential, and current probes for automatic scaling and units

### Portable design

- Lightweight design (only 7 lb./3.2 kg) for easy transport
- Optional internal battery operation provides up to three hours without line power

### Application modules for specialized analysis

- Advanced analysis module
- Limit testing module
- Telecommunications mask testing module
- Extended video module
- 601 serial digital video module

### Applications

- Digital design and debug
- Video installation and service
- Power supply design
- Education and training
- Telecommunications mask testing
- Manufacturing test
- General bench testing

### DPOs provide greater level of insight into complex signals

The TDS3000C Series offers fast waveform capture rates on a continuous basis that save you time by quickly revealing the nature of faults, so advanced triggers can be applied to isolate them.

Real-time intensity grading highlights the details about the history of a signal's activity, making it easier to understand the characteristics of the waveforms you've captured. Unlike other comparable oscilloscopes, the history remains even after the acquisition has been stopped.

## Thermal Properties of Corning Glasses

For the convenience of those interested in the thermal properties of glasses manufactured by Corning, data on some representative glasses are listed in this document.

- The **strain point** represents the extreme upper limit of serviceability for annealed glass. The maximum service temperature will always be below this point.
- The **annealing point** is the temperature, at the upper end of the annealing range, at which the internal stress is reduced to a commercially acceptable value over a short period. In an annealing operation, the glass is slowly cooled from above the annealing point to somewhat below the strain point.
- The **softening point** is the temperature at which a small diameter fiber of the glass will elongate under its own weight. As one moves above this temperature, the glass becomes more workable.
- As a general rule, the **coefficient of expansion** indicates the thermal shock resistance of the glass. The lower the expansion, the greater the resistance of the glass to sudden temperature changes.

|                   |  |                        |              |                 |                |            |               |
|-------------------|--|------------------------|--------------|-----------------|----------------|------------|---------------|
| 1.                | Corning Glass Code   |                        | 0080         | 7740            | 7800           | 7913       | 0211          |
| 2.                | Type   |                        | Soda lime    | Boro-silicate   | Boro-silicate  | 96% Silica | Zinc Titanium |
| 3.                | Color  |                        | Clear        | Clear           | Clear          | Clear      | Clear         |
| 4.                | Principal Use  |                        | Petri dishes | General Labware | Pharmaceutical | High Temp. | Cover Glass   |
| 5.                | Thermal Expansion Multiply by $10^{-7}$ cm/cm/°C   | 0 - 300°C.             | 93.5         | 32.5            | 55             | 7.5        | 73.8          |
|                   |  | 25°C. to setting point | 105          | 35              | 53             | 5.52       | ---           |
| 6 <sup>a</sup> .  | Upper Working Temp. for annealed glass (Mechanical considerations only)                              | Normal service °C.     | 110          | 230             | 200            | 900        | ---           |
|                   |  | Extreme service °C.    | 460          | 490             | 460            | 1200       | ---           |
| 7 <sup>b</sup> .  | Thermal Shock Resistance (15x15cm annealed plates) Data are approximate; see footnote <sup>c</sup> . | 3.2mm thick °C         | 65           | 160             | ---            | ---        | ---           |
|                   |  | 6.4mm thick °C         | 50           | 130             | ---            | ---        | ---           |
|                   |  | 12.7mm thick °C        | 35           | 90              | ---            | ---        | ---           |
| 8 <sup>d</sup> .  | Thermal Stress Resistance °C.  |                        | 16           | 54              | 33             | 220        | ---           |
| 9.                | Viscosity Data (These data are subject to normal manufacturing variations.)                          | Strain point °C.       | 473          | 510             | 521            | 890        | 508           |
|                   |  | Annealing point °C.    | 514          | 560             | 565            | 1020       | 550           |
|                   |  | Softening point °C.    | 696          | 821             | 785            | 1530       | 720           |
|                   |  | Working point °C.      | 1005         | 1252            | 1189           | ---        | 1008          |
| 10.               | Density g/cm <sup>3</sup>  |                        | 2.47         | 2.23            | 2.34           | 2.18       | 2.57          |
| 11.               | Young's Modulus (multiply by $10^3$ kg/mm <sup>2</sup> )   |                        | 7.2          | 6.4             | ---            | 6.8        | 7.6           |
|                   | Poisson's Ratio  |                        | 0.22         | .20             | ---            | 0.19       | 0.22          |
| 12.               | Log <sub>10</sub> of Volume Resistivity ohm/cm.  | 25°C                   | 12.4         | 15.0            | ---            | 17+        | ---           |
|                   |  | 250°C                  | 6.4          | 8.1             | 7.0            | 9.7        | 8.3           |
|                   |  | 350°C                  | 5.1          | 6.6             | 5.7            | 8.1        | 6.7           |
| 13.               | Dielectric Properties (1 MHz 20°C)   | Power factor %         | 0.9          | 0.50            | ---            | ---        | ---           |
|                   |  | Dielectric constant    | 7.2          | 4.6             | ---            | 3.8        | 6.7           |
|                   |  | Loss factor %          | 6.5          | 2.6             | ---            | 0.15       | 0.46          |
| 14 <sup>d</sup> . | Refractive index   |                        | 1.512        | 1.474           | 1.491          | 1.458      | 1.523         |
| 15.               | Stress-Optical Coefficient, (nm/cm)/(kg/mm <sup>2</sup> )  |                        | 277          | 394             | 319            | ---        | 361           |