



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
ELÉCTRICA – INSTRUMENTACIÓN

INSTRUMENTACIÓN DE UN HIDRÓFONO EN FIBRA ÓPTICA EMPLEANDO UN  
INTERFERÓMETRO TIPO SAGNAC

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
ING. FRANCISCO JAVIER ALVAREZ RAMÍREZ

TUTOR PRINCIPAL:  
Dr. GABRIEL EDUARDO SANDOVAL ROMERO

MÉXICO, CIUDAD DE MÉXICO, SEPTIEMBRE DE 2017

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dra. Mónica Vázquez Hernández  
Secretario: Dr. Naser Qureshi  
Vocal: Dr. Gabriel Eduardo Sandoval Romero  
1<sup>er.</sup> Suplente: Dr. Caleb Rascón Estebané  
2<sup>d o.</sup> Suplente: Dra. Celia Angelina Sánchez Pérez

Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico, Ciudad de México.

**TUTOR DE TESIS:**

Dr. Gabriel Eduardo Sandoval Romero

-----  
**FIRMA**

## **Agradecimientos**

A la Universidad Nacional Autónoma de México por permitirme continuar con mis estudios de posgrado, a través de su programa de Maestría en Ingeniería Eléctrica.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo brindado por permitirme dedicarme de tiempo completo en mis estudios de posgrado.

A la DGAPA-UNAM por el apoyo otorgado por medio del proyecto PAPIIT IT101515.

A mi director de tesis, Dr. Gabriel Eduardo Sandoval Romero, por impulsarme a continuar con mis estudios de posgrado, por su apoyo y la amistad brindada durante todo este tiempo.

A mis sinodales: Dra. Celia Sánchez, Dra. Mónica Vázquez, Dr. Naser Qureshi y Dr. Caleb Ráscon por el tiempo dedicado a leer este trabajo de tesis y por sus aportaciones realizadas para culminar de la mejor manera este trabajo.

A mis compañeros de laboratorio de sensores: Rodolfo, Miguel, Carlos y Nathalie; por su amistad y recomendaciones a lo largo del posgrado.

<b>Índice General</b>	
<b>Índice de figuras</b> .....	v
<b>Índice de tablas</b> .....	vii
<b>Resumen</b> .....	viii
<b>Introducción</b> .....	ix
<b>Objetivos específicos</b> .....	ix
<b>Capítulo 1. Antecedentes</b> .....	1
<b>1.1. Hidrófono</b> .....	1
<b>1.2. Hidrófonos piezoeléctricos</b> .....	1
<b>1.2.1. Hidrófono de membrana</b> .....	3
<b>1.2.2. Hidrófono de aguja</b> .....	4
<b>1.2.3. Hidrófonos subacuáticos de baja frecuencia</b> .....	5
<b>1.3. Hidrófonos en fibra óptica</b> .....	6
<b>1.3.1. El hidrófono en fibra óptica de Eisenmenger</b> .....	7
<b>1.3.2. Hidrófonos de rejillas de Bragg (FBG)</b> .....	8
<b>1.3.3. Hidrófonos basados en interferómetros</b> .....	10
<b>1.3.3.1. Interferómetro de Mach-Zehnder</b> .....	10
<b>1.3.3.2. Interferómetro de Michelson</b> .....	12
<b>1.3.3.3. Interferómetro de Fabry-Perot</b> .....	13
<b>1.3.3.4. Interferómetro de Sagnac</b> .....	14
<b>Capítulo 2. Montaje experimental</b> .....	17
<b>2.1. Hidrófono en fibra óptica propuesto</b> .....	17
<b>2.1.1. Elección de la fuente óptica</b> .....	18
<b>2.1.2. Principio de operación</b> .....	19
<b>2.1.3. Obtención de la señal de salida del hidrófono</b> .....	20
<b>2.1.4. Elaboración del elemento de detección (mandril)</b> .....	21
<b>2.2. Pruebas con una señal de excitación sinusoidal continua</b> .....	23
<b>2.2.1. Barrido en frecuencia para el mandril de aluminio</b> .....	23
<b>2.2.2. Separación entre la fuente y el mandril de aluminio</b> .....	25
<b>2.2.4. Separación entre la fuente y el mandril de vidrio</b> .....	28
<b>2.3. Pruebas con una señal de excitación en sinusoidal pulsada</b> .....	28

2.3.1. Barrido en frecuencia .....	28
2.3.2. Separación entre la fuente y el sensor.....	29
Capítulo III. Análisis de resultados .....	30
3.1. Análisis espectral.....	30
3.1.1. Espectros en frecuencia de la señales con una excitación continua	30
3.1.2. Espectros en frecuencia de las señales con una excitación pulsada	31
3.2. Atenuación de la señal.....	33
3.2.1. Atenuación de las señales con una excitación de onda continua.....	33
3.2.2. Atenuación de las señales con una excitación pulsada.....	34
3.3. Desfase de la señal .....	35
3.3.1. Desfase de la señal de salida del hidrófono para una señal de excitación continua.....	37
3.3.2. Desfase de la señal de salida del hidrófono para una señal de excitación pulsada .....	39
3.4. Relación entre la tensión aplicada a la fuente y la tensión detectada por el sensor .....	40
3.4.1. Señal de excitación de onda continua .....	40
3.4.2. Señal de excitación de onda pulsada.....	41
3.5. Presión acústica producida por el buzzer.....	42
4.1. Conclusiones generales .....	47
4.2. Mejoras y trabajos a futuro.....	48
Referencias:.....	50

## Índice de figuras

<b>Figura 1.1.</b> Diagrama del principio de operación de un hidrófono piezoeléctrico [3]. .....	2
<b>Figura 1.2.</b> Representación esquemática del efecto piezoeléctrico. (a) Piezoeléctrico directo. Campo eléctrico $V$ aplicado al material cambia sus dimensiones ( $L$ =longitud, $T$ =espesor), donde $\Delta L$ = incremento en la longitud, $\Delta T$ = incremento del espesor; (b) Piezoeléctrico inverso. Esfuerzo mecánico $F$ en el material produce cargas $Q$ en la superficie, $P$ =componente de polarización eléctrica [4]. .....	2
<b>Figura 1.3.</b> Hidrófono de membrana [1]. .....	4
<b>Figura 1.4.</b> Hidrófono de aguja [1]. .....	5
<b>Figura 1.5.</b> Hidrófono subacuático de baja frecuencia esférico (balón) [6]. .....	5
<b>Figura 1.6.</b> Esquemas de detección de un sensor en fibra óptica [9]. .....	7
<b>Figura 1.7.</b> Esquemas de un hidrófono en fibra óptica de Eisenmenger. El mecanismo de transducción se basa en la detección de cambios inducidos por presión en el desacople del índice de refracción entre la punta de fibra óptica y el agua. $P_d$ - fotodiodo de detección de la señal, $P_R$ - fotodiodo de detección de la señal de referencia [6]. .....	8
<b>Figura 1.8.</b> Esquema de una rejilla de Bragg y su respuesta espectral [9]. .....	9
<b>Figura 1.9.</b> Diagrama de un hidrófono en fibra basado en interferómetro Mach-Zehnder [8]. .....	11
<b>Figura 1.10.</b> Diagrama de un hidrófono en fibra basado en interferómetro Michelson [8]. .....	12
<b>Figura 1.11.</b> Diagrama de un hidrófono en fibra basado en interferómetro Fabry-Perot [9]. .....	13
<b>Figura 1.12.</b> Diagrama del efecto Sagnac [8]. .....	14
<b>Figura 1.13.</b> Esquema básico de un interferómetro de Sagnac [8]. .....	15
<b>Figura 1.14.</b> Diagrama de un hidrófono en fibra basado en interferómetro Sagnac [8]. .....	16
<b>Figura 2.1.</b> Esquema del hidrófono en fibra óptica propuesto. .....	17
<b>Figura 2.2.</b> Caracterización de la potencia de salida del láser Fabry-Perot en función de la corriente suministrada. .....	18
<b>Figura 2.3.</b> Comparación de la señal de salida del hidrófono con diferentes fuentes. a) Diodo super-luminiscente. b) Láser Fabry-Perot. .....	19
<b>Figura 2.4.</b> Señales obtenidas en el osciloscopio para una frecuencia de 3.35 kHz. .....	20
<b>Figura 2.5.</b> Diagrama de un mandril de fibra óptica [29]. .....	21

<b>Figura 2.6.</b> Señal de salida del hidrófono en función del número de espiras que conforma el mandril de aluminio.....	22
<b>Figura 2.7.</b> Sistema de posicionamiento mecánico en los ejes XZ, alineación del buzzer con el mandril de aluminio. ....	23
<b>Figura 2.8.</b> Barrido en frecuencia del mandril de aluminio excitando el buzzer con una señal sinusoidal continua de $2 V_{pp}$ . ....	24
<b>Figura 2.9.</b> Barrido de la tensión de alimentación del buzzer a una frecuencia de 3.35 kHz para el mandril de aluminio. ....	25
<b>Figura 2. 10.</b> Señal de salida del hidrófono en función de la distancia entre el buzzer y el mandril de aluminio aplicando una señal sinusoidal continua.....	26
<b>Figura 2. 11.</b> Barrido en frecuencia excitando el buzzer con una señal sinusoidal continua de $2 V_{pp}$ para el mandril de vidrio.....	27
<b>Figura 2. 12.</b> Barrido de la tensión de alimentación del buzzer a una frecuencia de 3.35 kHz para el mandril de vidrio. ....	27
<b>Figura 2.13.</b> Señal de salida del hidrófono en función de la distancia entre el buzzer y el mandril de vidrio aplicando una señal sinusoidal continua. ....	28
<b>Figura 2. 14.</b> Barrido en frecuencia con una señal de excitación sinusoidal pulsada de $2 V_{pp}$ . a) Mandril de aluminio, b) Mandril de vidrio. ....	29
<b>Figura 2. 15.</b> Desplazamientos de la posición de la fuente acústica con respecto al mandril de aluminio empleando onda pulsada de 3.35 kHz. ....	29
<b>Figura 3.1.</b> Análisis espectral de las señales detectadas por el hidrófono para un rango de frecuencias de 3-6 kHz, a) Mandril de aluminio b) Mandril de vidrio. ....	30
<b>Figura 3.2.</b> Análisis espectral de las señales detectadas por el hidrófono para un rango de frecuencias de 10-30 kHz, a) Mandril de aluminio b) Mandril de vidrio. .	31
<b>Figura 3.3.</b> Análisis espectral de las señales detectadas por el hidrófono para un rango de frecuencias de 3-6 kHz, a) Mandril de aluminio b) Mandril de vidrio. ....	31
<b>Figura 3.4.</b> Análisis espectral de las señales detectadas por el hidrófono para un rango de frecuencias de 10-30 kHz. a) Mandril de aluminio b) Mandril de vidrio. .	32
<b>Figura 3.5.</b> Espectros de la señales de salida del generador de funciones, a) 3-6 kHz, b) 10-30 kHz.....	32
<b>Figura 3.6.</b> Atenuación de la señal acústica medida con el hidrófono. a) Mandril de aluminio, b) Mandril de vidrio.....	33
<b>Figura 3.7.</b> Atenuación de la señal pulsada al alejar la fuente del sensor, a) Mandril de aluminio, b) Mandril de vidrio.....	34
<b>Figura 3.8.</b> Fase de un sistema sin distorsión [31]. ....	36
<b>Figura 3.9.</b> Desfase de la señal continua a una frecuencia de 3.35 kHz, como resultado de alejar la fuente del mandril a) Mandril de aluminio, b) Mandril de vidrio. ....	37

<b>Figura 3.10.</b> Desfase de la señal continua a diferente frecuencia, como resultado de alinear la fuente del mandril, a) 3 kHz (aluminio) b) 4 kHz (aluminio), c) 5 kHz (vidrio) y d) 6 kHz (vidrio). .....	38
<b>Figura 3.11.</b> Desfase de la señal pulsada a una frecuencia de 3.35 kHz, como resultado de alejar la fuente del mandril a) Mandril de aluminio, b) Mandril de vidrio. ....	40
<b>Figura 3.12.</b> Amplitud de la señal de salida del hidrófono para ambos mandriles en función de la tensión de alimentación del buzzer para señal continua. ....	40
<b>Figura 3.13.</b> Amplitud de la señal de salida del hidrófono para ambos mandriles en función de la tensión de alimentación del buzzer para señal pulsada. ....	42
<b>Figura 3.14.</b> Esquema del montaje del sensor HER-403 para medir la presión acústica producida por el buzzer. ....	43
<b>Figura 3. 15.</b> Nivel de presión del sonido para el rango de frecuencia de 3-9 kHz. ....	44
<b>Figura 3. 16.</b> Nivel de presión de sonido en función de la distancia de separación entre el buzzer y el sonómetro. ....	45

## Índice de tablas

<b>Tabla 3.1.</b> Atenuación de la señal continua. ....	34
<b>Tabla 3.2.</b> Atenuación de la señal pulsada. ....	35
<b>Tabla 3.3.</b> Desfase de la señal continua como resultado de alejar la fuente del mandril. ....	38
<b>Tabla 3.4.</b> Retardo de la señal continua para todo el rango de frecuencias. ....	39
<b>Tabla 3.5.</b> Retardo de la señal pulsada con frecuencia de resonancia. ....	39
<b>Tabla 3.6.</b> Relación de voltajes detectados por los dos mandriles aplicando una señal continua. ....	41
<b>Tabla 3.7.</b> Relación de voltajes detectados por los dos mandriles aplicando una señal pulsada. ....	41
<b>Tabla 3. 8.</b> Presión acústica de la fuente al variar la frecuencia. ....	44
<b>Tabla 3.9.</b> Presión acústica de la fuente al variar la tensión de alimentación de la fuente. ....	45
<b>Tabla 3.10.</b> Atenuación del nivel de presión sonora en función de la distancia entre el buzzer y el sonómetro. ....	46



## Resumen

En este trabajo de tesis se describe el diseño, implementación y caracterización de hidrófono en fibra óptica para la detección de campos acústicos en un rango de frecuencias de 3-30 kHz. El principio de operación del hidrófono propuesto basa su funcionamiento en el interferómetro de Sagnac debido a la simplicidad de su implementación y alta sensibilidad con respecto a la de otros hidrófonos, que utilizan configuraciones en donde se requiere de dos mandriles (sensor y referencia) como en el caso del interferómetro de Michelson y del interferómetro de Mach-Zehnder; además la fabricación del elemento sensor resulta más sencillo en su construcción que la de una cavidad resonante como en un interferómetro de Fabry-Perot, finalmente solo requiere de unos centos de metros para detectar señales en el rango de ultrasonido (>20 kHz).

El presente trabajo está dividido en cuatro capítulos. En el capítulo uno, se hace una revisión de los diferentes mecanismos de transducción de algunos hidrófonos en fibra óptica, así como las ventajas que ofrecen con respecto a los hidrófonos piezoeléctricos convencionales. En el capítulo dos, se describe el montaje experimental y el principio de operación del sensor; la selección de los materiales (aluminio y vidrio) para la fabricación del elemento sensor (mandril) y se indican las pruebas necesarias en la caracterización del sensor con excitación de señal continua y pulsada. En el capítulo 3, se presentan los resultados para la caracterización del hidrófono en función del rango de frecuencias en que opera el sensor y de la tensión de alimentación del buzzer; además del análisis del desfase y atenuación de la amplitud de la señal acústica a medida que es alejada la fuente acústica del mandril. Finalmente, en el capítulo cuarto, se comparan y reportan los resultados obtenidos, que indican cuál de los dos mandriles tuvo una mejor respuesta para medir el campo acústico producido por el buzzer y se proponen algunas mejoras para trabajo a futuro.

## Introducción

Los hidrófonos piezoeléctricos pueden satisfacer los requerimientos de muchas aplicaciones de medición de ultrasonido. Sin embargo, hay ciertas limitaciones asociadas con los mecanismos de transducción que pueden imposibilitar su uso en algunas circunstancias en donde los hidrófonos en fibra óptica pueden superarlos.

Los hidrófonos en fibra óptica han sido ampliamente disponibles en la última década, estos dispositivos tienen propiedades únicas y especiales que proporcionan una amplia gama de oportunidades de medición de campos de alta intensidad o potencia, por encima y más allá de sus contrapartes piezoeléctricas, ya que permiten realizar mediciones simultáneas de presión y temperatura. Afortunadamente, las similitudes entre los dos tipos de dispositivos aseguran que los métodos de medición por ultrasonidos desarrollados para los hidrófonos piezoeléctricos son a menudo igualmente aplicables a los dispositivos de fibra óptica. De hecho, se debe considerar cuál de estos dispositivos es el más indicado para un escenario de medición dado. En aplicaciones comerciales implican la posibilidad de micrófonos totalmente ópticos, sensores sísmicos para la exploración de petróleo, etc. La mayor parte del desarrollo de sensores acústicos de alto rendimiento ha sido dedicado al interferómetro Mach-Zehnder. Sin embargo, El interferómetro de Sagnac ofrece una alternativa que particularmente es bien adaptada a la detección de señales de mayor frecuencia.

Los sensores acústicos en fibra óptica han mostrado ser extremadamente sensibles y dispositivos de muy bajo costo que son usados en una gran gama de aplicaciones. Por ejemplo, las aplicaciones militares incluyen la formación de arreglos de sensores acústicos detrás de un barco o submarino, arreglos en el fondo del mar para la protección costera.

### Objetivo general

El objetivo principal de este trabajo es detectar ondas acústicas en el rango de frecuencias de kHz, implementando un hidrófono en fibra óptica basado en un interferómetro de Sagnac, con el cual se determina la amplitud, frecuencia y la fase de la señal de ondas acústicas.

### Objetivos específicos

- ✓ Diseñar y comparar dos mandriles (elemento sensor) conformados de diferentes dimensiones, material y espesor para determinar cual tiene mejor sensibilidad a los campos acústicos.
- ✓ Detectar con el sensor la forma de onda, la frecuencia y amplitud del campo acústico generado por el buzzer; para la excitación de onda continua y onda pulsada.
- ✓ Determinar la distancia a la que se encuentran separada la fuente acústica del hidrófono. partir de la diferencia del tiempo de vuelo de la señal acústica.
- ✓ Calibrar el sensor en función de la presión acústica generada por el buzzer.

## Capítulo 1. Antecedentes

En este capítulo se describen el concepto de hidrófono y sus aplicaciones, realizando una revisión de los hidrófonos convencionales basados en piezoeléctricos y los hidrófonos basados en fibra óptica, describiendo su principio de funcionamiento y sus diferentes configuraciones para ambos casos.

### 1.1. Hidrófono

En los últimos años ha surgido la necesidad de medir cuantitativamente las características temporales y espaciales de los campos acústicos, de tal modo que para realizar mediciones en lugares específicos dentro de estos, se requiere el uso de dispositivos denominados micrófonos e hidrófonos cuando están sumergidos en un líquido.

La palabra hidrófono deriva de “hydro” (agua) y “phone” (sonido), es decir, el término es usado para referirse a cualquier transductor subacuático destinado exclusivamente a recibir señales acústicas [1]. Estos sensores tienen la función de detectar las variaciones producidas por la presión de señales acústica y ruido en el agua para transformar esa señal en un voltaje de salida proporcional a la presión de las señales [2].

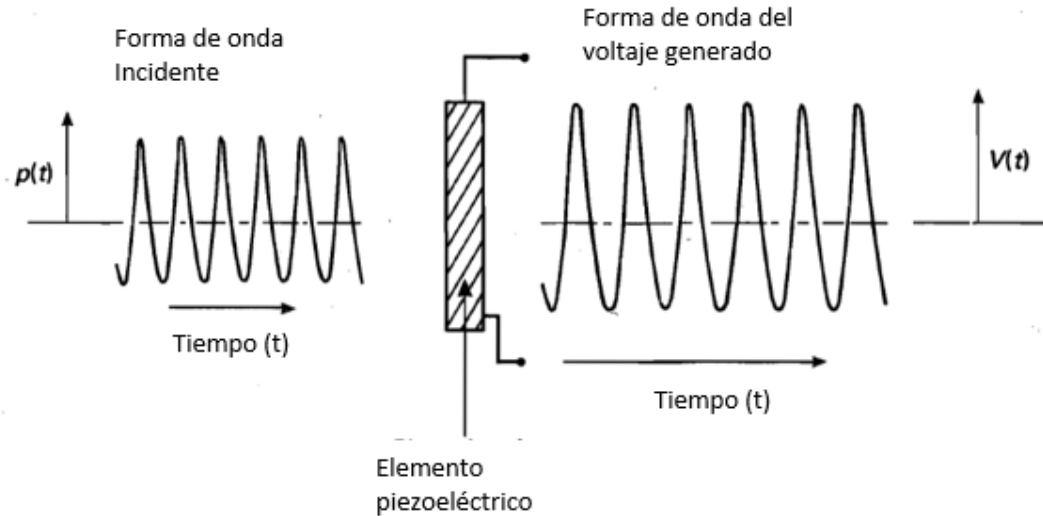
Todo hidrófono sin importar su tipo deberá cubrir con los siguientes requisitos:

- Tener un amplio ancho de banda para permitir una evaluación precisa del contenido de alta y baja frecuencia dentro de una forma de onda.
- Tener una pequeña área activa acústica para minimizar el promedio espacial y proporcionar una respuesta menos direccional.
- Acústicamente transparentes para minimizar las perturbaciones del campo que se está midiendo.
- Tener una salida acústica que sea estable sobre una gran escala de tiempo, así la respuesta en frecuencia del hidrófono puede ser evaluada (mediante un proceso de calibración) y subsecuentemente usada para convertir el voltaje detectado a una presión acústica.
- Una relación señal a ruido que permita medir señales muy pequeñas.

Existen diferentes tipos de hidrófonos, sin embargo, estos pueden ser clasificados en dos grandes categorías: hidrófonos piezoeléctricos e hidrófonos en fibra óptica.

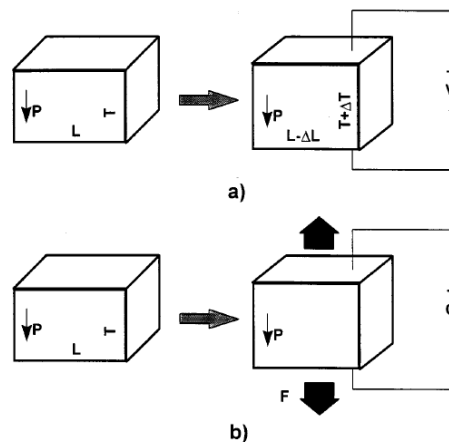
### 1.2. Hidrófonos piezoeléctricos

Los hidrófonos piezoeléctricos consisten de placas o películas delgadas de un material piezoeléctrico, que convierten una onda de presión acústica incidente en una señal eléctrica, en la figura 1.1, se muestra un diagrama del principio de operación de un hidrófono piezoeléctrico [3].



**Figura 1.1.** Diagrama del principio de operación de un hidrófono piezoeléctrico [3].

El fenómeno en el que basan su funcionamiento este tipo de hidrófonos es conocido como piezoelectricidad, ver figura 1.2. Este término se usa para describir la capacidad de ciertos materiales para generar una carga eléctrica  $Q$  que es proporcional al esfuerzo mecánico  $F$  aplicado. Estos materiales también muestran el efecto inverso, es decir, el material se deforma (se expande o se comprime) al aplicar un campo eléctrico  $V$  [4].



**Figura 1.2.** Representación esquemática del efecto piezoeléctrico. (a) Piezoeléctrico directo. Campo eléctrico  $V$  aplicado al material cambia sus dimensiones ( $L$ =longitud,  $T$ =espesor), donde  $\Delta L$ = incremento en la longitud,  $\Delta T$ = incremento del espesor; (b) Piezoeléctrico inverso. Esfuerzo mecánico  $F$  en el material produce cargas  $Q$  en la superficie,  $P$ =componente de polarización eléctrica [4].

Diferentes tipos de materiales piezoeléctricos son usados como elemento activo, sin embargo, la mayoría de los hidrófonos piezoeléctricos son cerámicos o polímeros piezoeléctricos.

Los piezoeléctricos cerámicos tienden a tener modos de resonancia bien definidos que son intrínsecamente relacionados a su geometría, espesor, modos de expansión, etc. Cuando los sistemas operan en resonancia tienen alta sensibilidad,

sin embargo, su respuesta es mucho más pequeña fuera de la resonancia debido a su alto factor de calidad mecánico. Por otra parte, tienen una alta impedancia acústica  $>17$  MRayl (unidad de impedancia acústica, definida como la relación entre la presión sonora efectiva y la velocidad efectiva de la partícula en la superficie, sus dimensiones en unidades MKS o SI, son  $\text{Nsm}^{-3}$ ). Una amplia variedad de transductores, sensores y actuadores han sido desarrollados usando el cerámico (PZT) titanato zirconato de plomo que es uno de los materiales piezoeléctricos más sensibles [5].

En cuanto al grupo de polímeros piezoeléctricos, el material que ha causado más interés es el PVDF (fluoruro de polivinilideno). Los polímeros tienen una impedancia acústica mucha más baja (típicamente 3-4 MRayl) que los cerámicos, son materiales inherentes de bajo factor de calidad y consecuentemente un amplio ancho de banda. Al ser empleados como fuentes de ultrasonido suelen tener una eficiencia relativamente baja, sin embargo, son excelentes receptores por lo que son utilizados en la construcción de hidrófonos de alta sensibilidad y de banda ancha [6].

Para el rango de frecuencias típicas de aplicaciones médicas hay comúnmente dos tipos de hidrófonos: tipo membrana y tipo aguja.

### **1.2.1. Hidrófono de membrana**

En la figura 2.3 se muestra un hidrófono de membrana, que consiste de una lámina delgada de película PVDF no polarizada, estirada sobre un anillo (diámetro interno de 100 mm) con electrodos de oro/cromo depositados al vacío sobre las superficie. Estos electrodos cubren sólo en una pequeña área central, que entonces es polarizada y forma así el elemento activo del dispositivo, que usualmente tiene un diámetro de 1.0 o 0.5 mm [3]. Existen dos subtipos de los hidrófonos de membrana, el diseño más simple es conocido como coplanario, que consiste de una sola capa de PVDF, mientras que la segunda versión es conocida como bilaminar que consiste de dos capas de PVDF con el elemento activo intercalado entre dos planos de tierra.

Estos hidrófonos son considerados como el estándar de oro para los hidrófonos, debido a que su respuesta en frecuencia varía suavemente sobre un amplio rango de frecuencias. Por esta razón, son excelentes para la caracterización de pulsos cortos de banda ancha que son producidos por sistemas de imágenes de ultrasonidos. Sin embargo, son menos adecuados para la medición de señales de onda continua debido a la posibilidad de flexión de los modos de onda estacionaria producidos en la membrana. Sus grandes dimensiones físicas impiden su uso en configuraciones con espacios limitados.



**Figura 1.3.** Hidrófono de membrana [1].

### **1.2.2. Hidrófono de aguja**

Los hidrófonos de aguja están contruidos a partir de una aguja metálica redondeada en su punta, que se recubre con una capa de PVDF, el grosor de la capa es menor cerca de la punta de la aguja y aumenta hacia el otro extremo (solamente una pequeña porción de la capa de PVDF cerca de la punta de la aguja es piezoeléctrica). De este modo, la aguja es al mismo tiempo el soporte mecánico de la capa de PVDF y uno de sus electrodos; el otro electrodo es una capa conductora en el lado exterior, producido por el deposito al vacío de plata o níquel o por aplicación de una pintura conductora, montado en el extremo de un tubo metálico delgado que está conectado a un cable coaxial en su otro extremo (para aislar el cable dentro de la tubería metálica, se llena con una resina epoxi no conductora) [7]. Las versiones anteriores de este tipo de sonda usaban PZT como el elemento piezoeléctrico activo. Sin embargo, el pequeño tamaño del elemento activo (<1mm) daba como resultado una sensibilidad muy baja. Además el gran desacople en la impedancia acústica entre el eje del sensor y el agua de alrededor, perturbaban significativamente la respuesta en frecuencia. Finalmente la geometría podía producir resonancias axiales y radiales.

Como regla general, los hidrófonos de aguja que incorporan un elemento activo piezocerámico tienen un ancho de banda más estrecho y presentan un pico resonante más notable que su contraparte de PVDF. Sin embargo las sondas piezocerámicas tienden a ser más resistentes y pueden ser más tolerantes a ambientes hostiles [6]. 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 con un diámetro de 1 mm aproximadamente.

Hoy en día son utilizados ampliamente dispositivos basados en un elemento PVDF, debido a su alta constante de recepción piezoeléctrica-g, que ofrece una alta sensibilidad y un ancho de banda más amplio (por tener una impedancia acústica cercana a la del agua).

La ventaja de las sondas de PVDF sobre los diseños cerámicos, consiste en que la impedancia acústica del PVDF es de naturaleza muy similar a la del agua, sin embargo, se producen cambios en la sensibilidad debido a las conexiones eléctricas. Aunque los diseños y la construcción de sonda de aguja en PVDF han

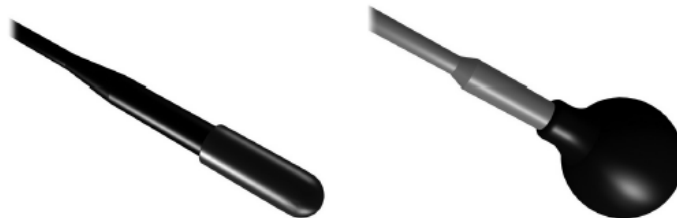
superado parcialmente los problemas de resonancia y reverberación que aquejan a los hidrófonos cerámicos, todavía tienen problemas con las rápidas fluctuaciones de sensibilidad, que ocurren en frecuencias entre 1 y 4 MHz, además de la rápida caída de sensibilidad por debajo de 1 MHz debido a la difracción alrededor de la punta de la sonda [3].



*Figura 1.4. Hidrófono de aguja [1].*

### **1.2.3. Hidrófonos subacuáticos de baja frecuencia**

La mayoría de los hidrófonos de baja frecuencia subacuáticos operan en frecuencias debajo de 500 kHz. Este tipo de dispositivos son frecuentemente usados en condiciones de mar abierto a profundidades que exceden los 100 m, por lo que necesitan una construcción robusta para resistir la presión hidrostática del mar. En la figura 1.5, se muestran las geometrías utilizadas para estos hidrófonos, que pueden ser cilíndricas o esféricas (balón), a menudo tienen un diámetro de 10-25 mm. La protección del elemento activo contra la corrosión, los daños por impacto y el crecimiento marino se consigue encapsulando el hidrófono con un caucho de poliuretano, sin embargo, como todos los medios visco-elásticos, la atenuación introducida por este último aumenta con la frecuencia y por lo tanto la sensibilidad por encima de la frecuencia de resonancia puede ser más rápida de lo que se obtendría con un único sistema resonante (como el de un hidrófono de membrana) [6].



*Figura 1.5. Hidrófono subacuático de baja frecuencia esférico (balón) [6].*

Los hidrófonos piezoeléctricos pueden reunir los requisitos para muchas aplicaciones de medición de ultrasonido. Sin embargo, existen ciertas limitaciones asociadas con el mecanismo de transducción piezoeléctrico que puede impedir su uso en algunas circunstancias, de este modo surge la necesidad de diseñar hidrófonos en fibra óptica (*Fiber Optic Hydrophone*, por sus siglas en inglés) que permitan superar estas limitaciones. Mientras que el rendimiento acústico y la utilidad de un hidrófono en fibra óptica dependen en gran medida del mecanismo de transducción específico empleado, existen algunas características comunes en la mayoría de los FOH. En primer lugar, la naturaleza óptica del mecanismo de detección significa que los FOH son intrínsecamente insensibles a las interferencias electromagnéticas. En segundo lugar, los FOH pueden ser más adecuados para caracterizar campos de ultrasonidos de alta intensidad o de alta potencia que pueden dañar los costosos electrodos piezoeléctricos. En algunos casos esto se debe a que el FOH es más robusto y menos susceptible al daño mecánico y térmico en relación a los dispositivos piezoeléctricos. En otros, se debe a que el elemento de detección óptico (ya sea la propia fibra o un elemento óptico externo) es de bajo costo y puede sustituirse si es dañado. En tercer lugar, el pequeño tamaño y flexibilidad de una fibra óptica permite a menudo fabricar dispositivos miniatura de tipo sonda para aplicaciones de acceso limitado (por ejemplo para realizar mediciones en tejidos biológicos). En cuarto lugar, a diferencia de los dispositivos piezoeléctricos, algunos FOH son sensibles tanto a la temperatura como a la presión, ofreciendo la posibilidad de realizar mediciones del calor inducido por campo de ultrasonido, como el producido en la terapia de HIFU (High Intensity Focused Ultrasound) [6].

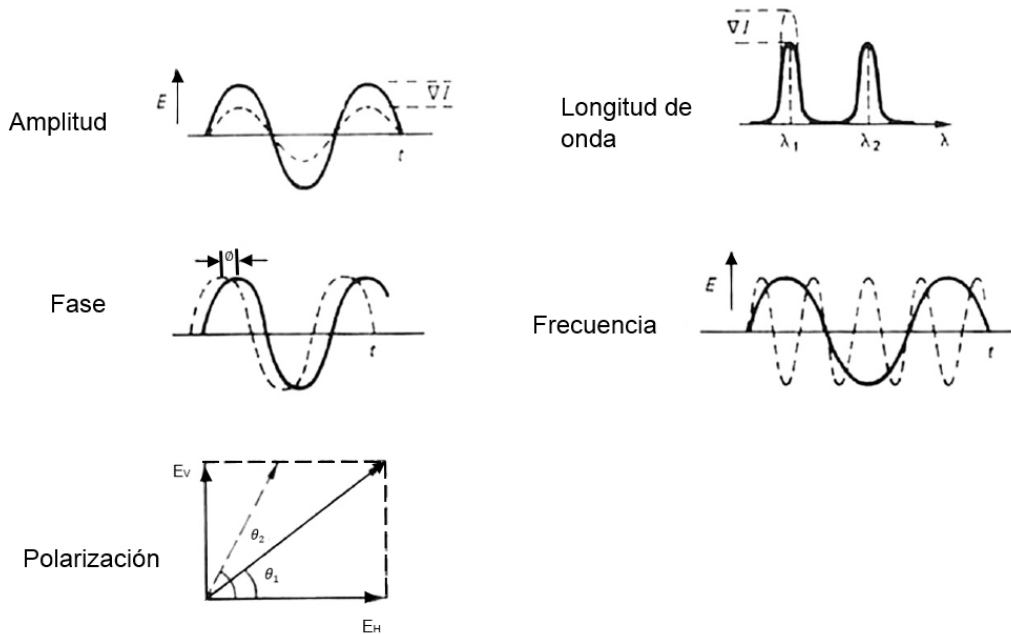
### **1.3. Hidrófonos en fibra óptica**

Un hidrófono en fibra óptica es un sensor que usa fibra óptica como el elemento sensor. Muchas de sus características lo hacen una alternativa muy prometedora de los sensores piezoeléctricos convencionales. Estas características incluyen alta sensibilidad, un gran rango dinámico e inmunidad a interferencias electromagnéticas [8].

Como los sensores de fibra óptica operan para modificar una o más propiedades de la luz propagándose a través de la fibra, ellos pueden ser clasificados como extrínsecos o intrínsecos. En los sensores tipo extrínsecos, la fibra óptica se utiliza como un medio para transportar luz a un sistema de detección externo, mientras que en el tipo intrínseco, la luz no tiene que salir de la fibra óptica para realizar la función de detección. Los sensores de fibra intrínsecos son más atractivos y ampliamente investigados; ya que este esquema tiene muchas ventajas en comparación con el extrínseco, como la flexibilidad en el diseño de la cabeza del sensor.

Además, dependiendo del principio de funcionamiento de un sensor de fibra es que el elemento sensor modula algún parámetro del sistema óptico como intensidad, fase, longitud de onda y polarización (como se puede ver en la figura 1.6), lo que da lugar a un cambio en las características de la señal óptica recibida en el detector [9].





**Figura 1.6.** Esquemas de detección de un sensor en fibra óptica [9].

A continuación se hace una descripción de los esquemas de detección más utilizados por los hidrófonos de fibra óptica.

### 1.3.1. El hidrófono en fibra óptica de Eisenmenger

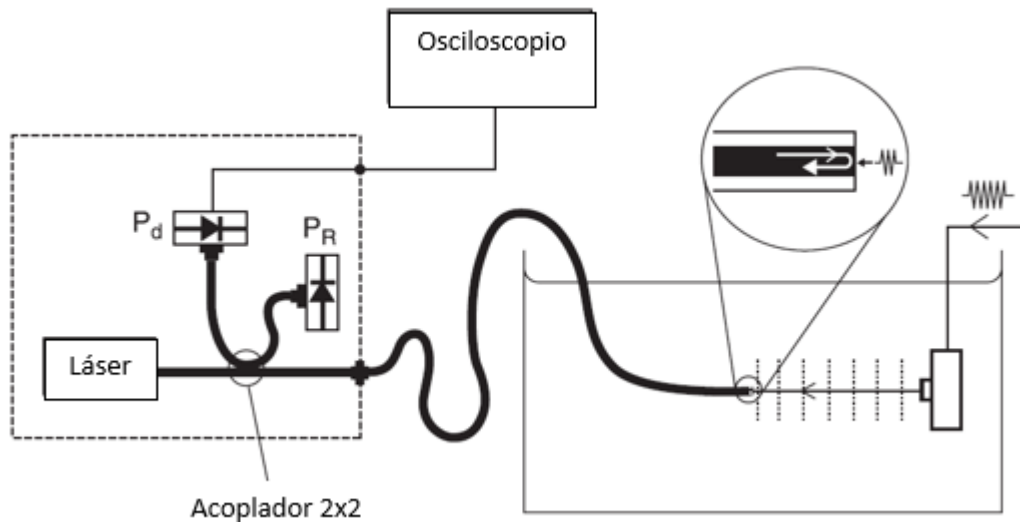
Uno de los diseños más simples de hidrófonos en fibra óptica (ver figura 1.7) fue propuesto por Staudenraus and Eisenmenger (1993). Ha sido adoptado por varios grupos de investigación para caracterizar la salida de las fuentes de onda de choque, transductores HIFU y es producido comercialmente por dos compañías (RP Acoustics y Onda Corp) [6].

Este hidrófono está conformado por una fibra óptica, cuyo extremo es cortado y sumergido en el medio de propagación del campo acústico (regularmente agua). El mecanismo de transducción de este sensor se basa en el cambio en el índice de refracción y ocurre cuando una presión  $p$  generada por una onda acústica incidente produce un cambio en la densidad y por lo tanto en el índice de refracción tanto de la punta de la fibra como del fluido en el que está sumergida. Como consecuencia se modula el desacoplamiento del índice de refracción en la frontera fibra-fluido, produciendo un cambio en el coeficiente de reflexión de Fresnel  $R(p)$  y por lo tanto en la potencia óptica reflejada a lo largo de la fibra [10,11]. El coeficiente de reflexión de Fresnel dependiente de la presión está dado por:

$$R(p) = \left[ \frac{n_f(p) - n_w(p)}{n_f(p) + n_w(p)} \right]^2, \quad (1.1)$$

donde  $n_f(p)$  es el índice de refracción del núcleo de la fibra y  $n_w(p)$  es el índice de refracción del medio donde está sumergida la fibra (agua).

La ventaja de este enfoque es la simplicidad de implementación y operación, el bajo costo de sus componentes, amplio ancho de banda y un alto límite de detección lineal. Además, la punta de la fibra tiene un alto umbral de daño mecánico (significativamente mayor a los hidrófonos piezoeléctricos) y si se produce un daño puede ser reparado fácilmente cortando la fibra. Sin embargo, una de sus limitaciones es su baja sensibilidad de detección como consecuencia de la débil dependencia de los índices de refracción de la fibra y el agua a la presión. Este tipo de hidrófonos necesita un láser muy potente, esto se debe a que el cambio de nivel en la reflectividad es muy bajo.



**Figura 1.7.** Esquemas de un hidrófono en fibra óptica de Eisenmenger. El mecanismo de transducción se basa en la detección de cambios inducidos por presión en el desacople del índice de refracción entre la punta de fibra óptica y el agua.  $P_d$ - fotodiodo de detección de la señal,  $P_R$ - fotodiodo de detección de la señal de referencia [6].

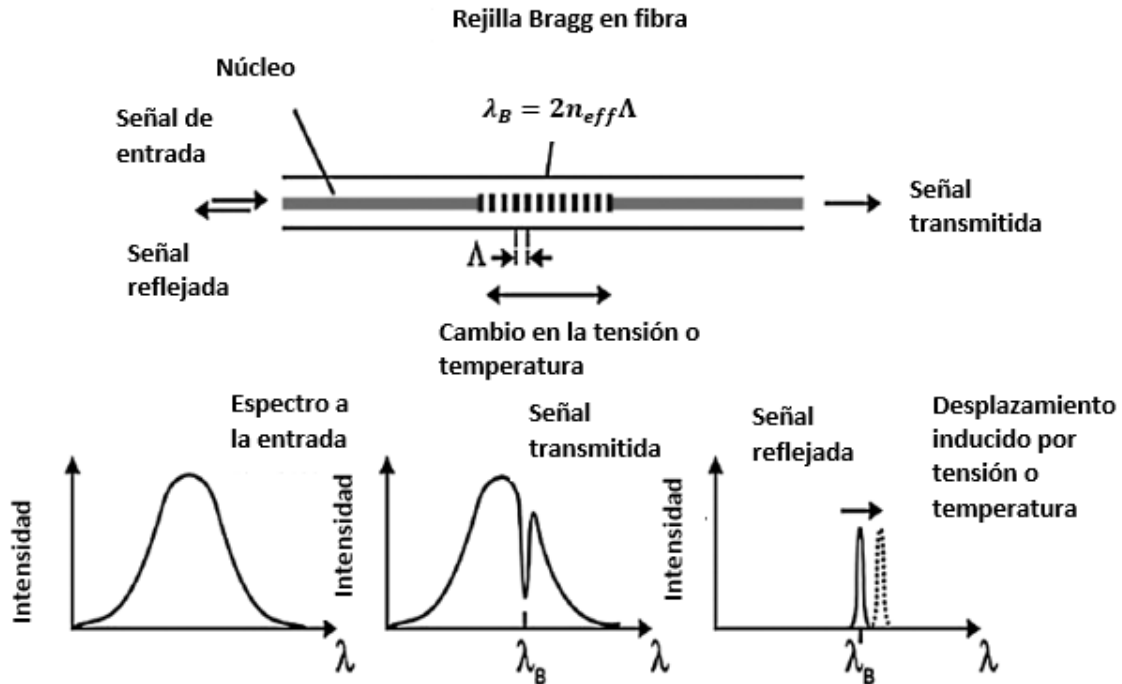
### 1.3.2. Hidrófonos de rejillas de Bragg (FBG)

La rejilla de Bragg (FBG, por sus siglas en inglés) comprende de una sección corta de fibra óptica monomodo en la que el índice de refracción del núcleo es modulado periódicamente [8]. La estructura de la rejilla actúa como un espejo selectivo para la longitud de onda que satisface la condición de Bragg ( $\lambda_B$ ).

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda, \quad (1.2)$$

donde  $n_{eff}$  es el índice de refracción efectivo del modo guiado de la fibra y  $\Lambda$  es el periodo de la rejilla.

Cuando la FBG es iluminada por una fuente óptica de banda ancha, se refleja una componente espectral de banda estrecha que corresponde a la longitud de onda de resonancia de Bragg ( $\lambda_B$ ) mientras se transmiten todas las otras longitudes de onda fuera de la banda de reflexión estrecha (ver figura 1.8) [12].



**Figura 1.8.** Esquema de una rejilla de Bragg y su respuesta espectral [9].

La rejilla de Bragg responde tanto a la tensión como a la temperatura. La tensión afecta la elongación de la fibra, cambiando la separación de la rejilla y ocasionando un cambio del índice de refracción asociado con el efecto de Poisson (efecto fotoelástico) debido a cambios dimensionales en la dirección radial. El cambio de temperatura causa la expansión térmica, cambiando la separación de la rejilla. El cambio en la longitud de onda de Bragg  $\Delta\lambda_B$ , asociado con los efectos de tensión y temperatura, están dados por:

$$\Delta\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \left[ \left\{ 1 - \left[ \frac{n_{eff}^2}{2} \right] [P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})] \right\} \varepsilon + \left( \alpha + \frac{dn_{eff}}{dT} \right) \Delta T \right], \quad (1.3)$$

donde  $\varepsilon$  es la tensión aplicada,  $P_{ij}$  es el coeficiente de Pockels (cambio lineal de índice de refracción con respecto al campo eléctrico aplicado) del tensor deformación-óptico,  $\alpha$  es el coeficiente de expansión térmica,  $\nu$  es la razón de Poisson,  $\Delta T$  es el cambio de temperatura y  $\frac{dn}{dT}$  es el coeficiente de temperatura del índice modal.

El principio de funcionamiento de un hidrófono basado en FBG se basa comúnmente en la modulación de intensidad de la luz láser debido al desplazamiento de la curva del espectro de potencia en transmisión del elemento sensor bajo la influencia del campo acústico.

Desafortunadamente, esta clase de sensores exhibe baja sensibilidad a la presión acústica debido al módulo de Young de la fibra óptica mientras la sensibilidad de la respuesta de la FBG decrece al reducir la longitud de onda Bragg por debajo de la

longitud de la rejilla. Con el fin de aumentar la sensibilidad, las FBG han sido recubiertas con materiales con un módulo elástico mucho menor que el de la fibra [13].

Trabajos en FBG para medir campos de ultrasonido comenzaron con Webb en 1996. Se empleó un método de interrogación para detectar la potencia de una fuente de ancho de banda estrecho. El resultado mostró una función de transferencia lineal entre la potencia acústica de entrada y la señal detectada [14,15].

### 1.3.3. Hidrófonos basados en interferómetros

La fase del campo de luz puede ser cambiada por las perturbaciones externas, de modo que el sensor de fibra óptica también puede ser construido sobre los cambios de fase del campo de luz. Para un interferómetro, donde la fase de la señal óptica que interfiere contiene la información de la magnitud medida, la fase del modo ( $\phi$ ) que se propaga por una fibra óptica de longitud  $L$  está dada por:

$$\phi = \beta L = \frac{2\pi\eta_{eff}}{\lambda} L, \quad (1.4)$$

donde  $\beta$  es la constante de propagación,  $\eta_{eff}$  es el índice de refracción efectivo del modo y  $\lambda$  es la longitud de onda. El cambio en la fase entonces es:

$$\Delta\phi = \beta\Delta L + L\Delta\beta = \Delta\phi_1 + \Delta\phi_2, \quad (1.5)$$

el término  $\Delta\phi_1$  en la expresión 1.5 representa el desplazamiento de la fase debido al estiramiento axial de la fibra:

$$\Delta\phi_1 = -\frac{\beta L}{E}(1 - 2\nu)\Delta P, \quad (1.6)$$

donde  $\nu$  es la razón de Poisson,  $E$  es el módulo de Young y  $\Delta P$  es el cambio de la presión acústica.

El término  $\Delta\phi_2$  en la ecuación 1.5 representa el cambio de la constante de propagación que depende de los cambios en el índice de refracción y el diámetro de la fibra producido por la tensión [16].

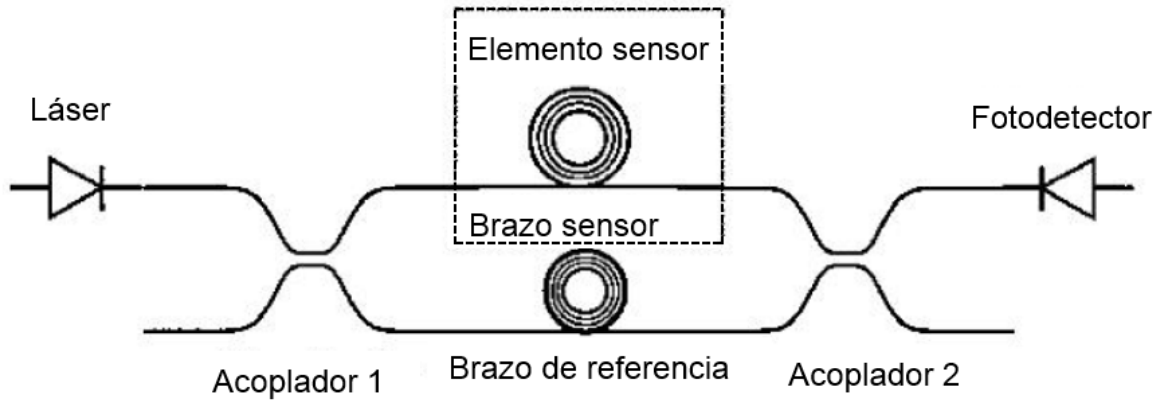
Hoy en día es ampliamente aceptado que para lograr una sensibilidad suficientemente alta, el hidrófono de fibra óptica deberá ser de tipo interferométrico y deberá medir los cambios de fase introducidos en el brazo de detección [8,17].

A través de los años, muchas arquitecturas de interferómetros han sido propuestas e investigadas para sistemas de hidrófonos. Las más importantes pueden ser divididas en cuatro configuraciones fundamentales: Mach-Zehnder, Michelson, Fabry-Perot y Sagnac.

#### 1.3.3.1. Interferómetro de Mach-Zehnder

Este interferómetro es uno de los principales esquemas utilizados en los primeros sistemas de hidrófonos [18]. En la figura 1.9 se muestra la configuración típica de este sensor, la luz de un láser es dividida en dos haces mediante un acoplador, uno de los haces entra en el brazo sensor y el otro al brazo de referencia. El elemento

de detección es sumergido en el medio de estudio, mientras el brazo de referencia permanece afuera proporcionando la fase de referencia, a la salida del segundo acoplador, estos dos haces son recombinados y enviados al fotodetector, que produce una corriente como resultando de la interferencia de los haces en el circuito receptor.



**Figura 1.9.** Diagrama de un hidrófono en fibra basado en interferómetro Mach-Zehnder [8].

Existen dos esquemas para este interferómetro: balanceado y desbalanceado. En el balanceado, el camino de la señal (brazo sensor) y el camino de referencia son casi iguales, esto se puede lograr eligiendo la longitud del brazo de referencia. Este esquema es muy popular porque generalmente no es sensible al ruido de fase de la fuente de luz y no requiere fuentes de alta coherencia (ancho de banda estrecho). Por otro parte, un esquema desbalanceado es más simple. Algunos esquemas de interrogación tales como el portador generador de fase (PGC, por sus siglas en inglés) requieren sustancialmente que el camino del interferómetro sea desbalanceado. El camino desbalanceado provoca ruido de fase en la salida láser que es convertido en ruido de intensidad y por lo tanto deteriora el rendimiento del sistema sensor. Otra desventaja de los esquemas desbalanceados es que tendrían que usar fuentes láser con una longitud de coherencia muy grande (que es esencialmente más grande que la diferencia de caminos, típicamente 50~150 m) [8].

Para recuperar la información de fase a partir de la intensidad de salida del hidrófono en fibra óptica, se han desarrollado varios esquemas de detección y procesamiento de la señal. Estos esquemas incluyen: homodinos pasivos, homodinos activos (seguimiento de la fase), heterodinos, pseudo-heterodinos. Entre estos, se prefiere el esquema homodino activo en comparación con la demodulación homodina pasiva porque tiene ventajas de reducción de ruido y simplicidad de operación. Sin embargo, el rango dinámico de la demodulación homodina activa es frecuentemente limitado por el sistema de retroalimentación. Además, la detección heterodina es otro esquema simple en concepto. Sin embargo, la adición de un modulador acusto-óptico en uno de los brazos del interferómetro puede ser difícil de implementar e indeseable en muchas aplicaciones, tales como en hidrófonos operados remotamente.

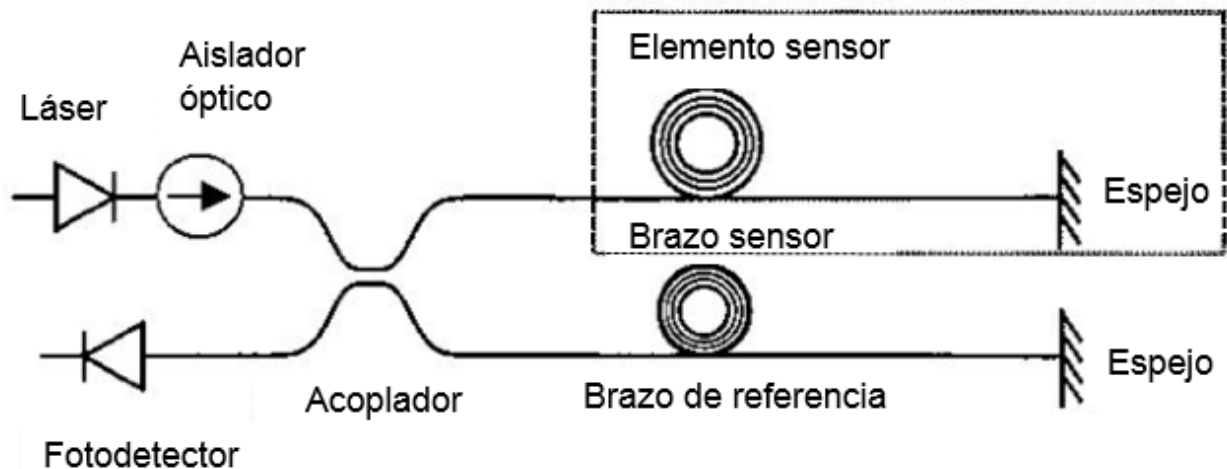
En comparación, el esquema heterodino de retardo diferencial es una técnica de desplazamiento de fase que no requiere un elemento activo o modulador de frecuencia óptica en la cabeza del sensor. En este enfoque, los pulsos ópticos que alternan entre dos frecuencias ligeramente diferentes son generados por una fuente láser de gran coherencia, que se envían a un interferómetro desbalanceado. De tal manera que se aprovecha el retardo diferencial entre los dos brazos de fibra del interferómetro desbalanceado para ajustar la separación temporal entre los dos pulsos. Finalmente un tren de pulsos de señales heterodinas es generado en el detector y subsecuentemente filtrada para extraer la señal acústica. La debilidad de este esquema es su sensibilidad al ruido de fase del oscilador láser [19].

En 1977 fue presentado por Bucaro, el primer sensor acústico en fibra óptica intrínseco basado en una configuración Mach-Zehnder para detectar ondas de ultrasonido en el agua, usando frecuencias en el rango de 40-400 kHz [15].

### 1.3.3.2. Interferómetro de Michelson

En la figura 1.10 se muestra el esquema de un hidrófono basado en un interferómetro de Michelson, en este caso un solo acoplador es usado para dividir y recombinar la luz.

La luz de la fuente láser es dividida en dos haces por el acoplador hacia el brazo sensor y el brazo de referencia, después de atravesar la longitud de cada uno de los brazos es reflejada por espejos hacia los mismos brazos y recombinada por el acoplador. Para evitar que las señales reflejadas sean alimentadas de nuevo a la fuente de luz es necesario utilizar un aislador óptico [20].

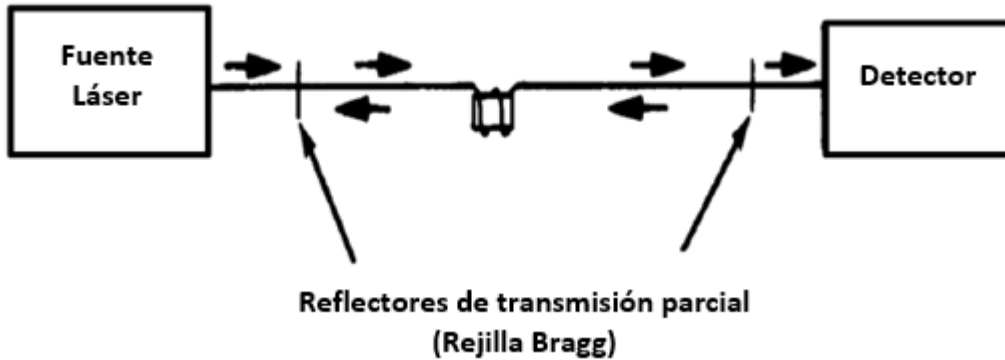


**Figura 1.10.** Diagrama de un hidrófono en fibra basado en interferómetro Michelson [8].

Una de las ventajas del interferómetro de Michelson sobre el interferómetro Mach-Zehnder es que el haz de detección pasa por el elemento sensor dos veces, por lo tanto teóricamente es dos veces más sensible.

### 1.3.3.3. Interferómetro de Fabry-Perot

En una configuración del sensor basada en una cavidad Fabry-Perot (mostrada en la figura 1.11), la señal de luz es reflejada varias veces hacia atrás y hacia adelante dentro de la cavidad. La señal de salida será máxima cuando todos los haces de salida estén en fase y decaerá rápidamente cuando estén fuera de fase. Por lo tanto, al producir un pequeño cambio de fase en la cavidad puede resultar en un gran cambio en la intensidad de salida [8].



*Figura 1.11. Diagrama de un hidrófono en fibra basado en interferómetro Fabry-Perot [9].*

Un enfoque prometedor que ha sido explorado para la metrología de ultrasonido médico, se basa en la detección de cambios inducidos acústicamente en el espesor óptico de un interferómetro Fabry-Perot situado en la punta de una fibra óptica. Se han demostrado dos variantes de este enfoque, que se distinguen por los materiales y métodos utilizados para fabricar la cavidad resonante. Uno implica la pulverización catódica sobre la punta de la fibra, permitiendo con esta pequeña estructura (pocos micrómetros) anchos de banda de varios cientos de megahertz, mientras que el segundo enfoque emplea un separador de polímero entre los dos espejos del interferómetro [21].

Para el segundo enfoque, la variación de la potencia óptica reflejada  $P_r$ , de un interferómetro Fabry-Perot en función de la fase  $\phi$  esta dada por:

$$\phi = \frac{4\pi n l}{\lambda}, \quad (1.7)$$

donde  $n$  y  $l$  son el índice de refracción y el espesor del separador polimérico entre espejos, respectivamente y  $\lambda$  es la longitud de onda de la fuente óptica. En general, la sensibilidad de fase acústica puede ser escrita como:

$$\frac{d\phi}{dp} = \frac{4\pi}{\lambda} \left( n_0 \frac{dl}{dp} + l \frac{dn}{dp} \right) F_l(k), \quad (1.8)$$

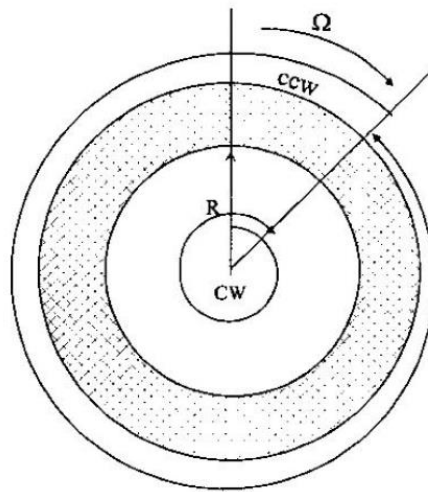
donde  $dl$  es un pequeño cambio en el espesor del separador polimérico y  $dn$  es un pequeño cambio en el índice de refracción.  $F_l(k)$  es un término modificador de frecuencia que explica la variación espacial tensión en el separador que se produce

cuando una onda acústica incide en el sensor y depende de la geometría, estructura y propiedades físicas de la punta de la fibra.

En [22] se describe un hidrófono en fibra óptica que puede realizar mediciones simultáneas de presión acústica y temperatura en el mismo lugar, su mecanismo de traducción se basa en la detección de cambios inducidos acústicamente y térmicamente en un interferómetro Fabry-Perot de película polimérica depositada en la punta de una fibra óptica monomodo. Este dispositivo tiene un ancho de banda de 50 MHz, una alta sensibilidad- 2 KPa, y un pequeño elemento ópticamente definido- 10  $\mu\text{m}$ .

### 1.3.3.4. Interferómetro de Sagnac

El interferómetro de Sagnac fue demostrado por primera vez por Monsieur Sagnac en 1913 [23]. Una simple representación del efecto de Sagnac se muestra en la figura 1.12, este interferómetro actúa como un dispositivo no recíproco donde las ondas de luz que se propagan en una dirección del embobinado de rotación, no son equivalentes a la onda de luz que se propaga en la dirección opuesta. Considerando dos ondas de luz propagándose en direcciones opuestas alrededor del anillo del interferómetro mostrado en la figura 1.12, que está girando a una velocidad  $\Omega$  en dirección horaria.



**Figura 1.12.** Diagrama del efecto Sagnac [8].

Las dos ondas de luz viajan distancias diferentes dentro de la fibra y toman un tiempo diferente para recorrer la longitud total de fibra. La longitud del camino efectivo está dada por:

$$L_{CW} = 2\pi R + R\Omega t_{CW} = ct_{CW} \quad (1.9)$$

y

$$L_{CCW} = 2\pi R - R\Omega t_{CCW} = ct_{CCW}, \quad (1.10)$$

donde los tiempos transitorios  $t_{CW}$  y  $t_{CCW}$  son de las ondas de luz que viajan en dirección horaria y anti-horaria respectivamente. La velocidad de la luz en espacio



libre es identificada con la letra  $c$  y  $R$  es el radio del anillo. La diferencia del tiempo transitorio  $\delta t$  entre las ondas en contra-propagación para  $N$  vueltas del embobinado en un área  $A = \pi R^2$  está dada por:

$$\delta t = t_{CW} - t_{CCW} = \left( \frac{4NA}{c^2} \right) \Omega, \quad (1.11)$$

asumiendo que  $c^2 \gg R^2 \Omega^2$ , la diferencia de la longitud del camino óptico resultante  $\delta L$  está dado por:

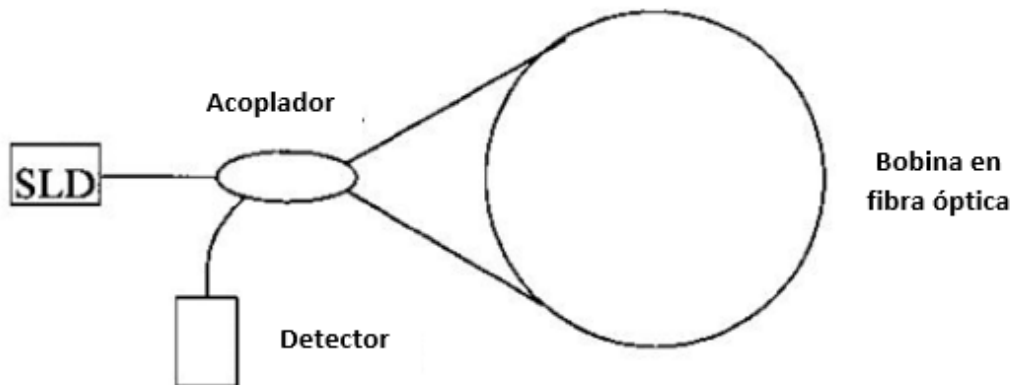
$$\delta L = \left( \frac{4NA}{c} \right) \Omega, \quad (1.12)$$

en la versión del interferómetro de Sagnac en fibra óptica, el cambio de fase causado por una rotación puede ser expresado en términos de  $\delta L$  como:

$$\delta \phi = \left( \frac{2\pi}{\lambda} \delta L \right) = \left( \frac{8\pi NA}{\lambda c} \right) \Omega, \quad (1.13)$$

donde  $\lambda$  es la longitud de onda de la luz en espacio libre. Múltiples vueltas de fibra óptica pueden ser enrolladas para incrementar significativamente  $\delta L$  y así mejorar la sensibilidad. Sin embargo, la atenuación óptica tiende a limitar la longitud de la fibra a solo varios kilómetros [8].

La configuración más básica (ver figura 1.13) del interferómetro de Sagnac consta de una fuente de luz de banda ancha como por ejemplo un diodo superluminiscente (SLD), que al llegar a una acoplador divide la luz en dos ondas. Después de atravesar el acoplador, los dos haces de luz se propagan igual en dirección opuesta alrededor de la bobina de fibra óptica, de tal manera que las ondas de luz que interfieren al volver al acoplador sean enviadas al detector.

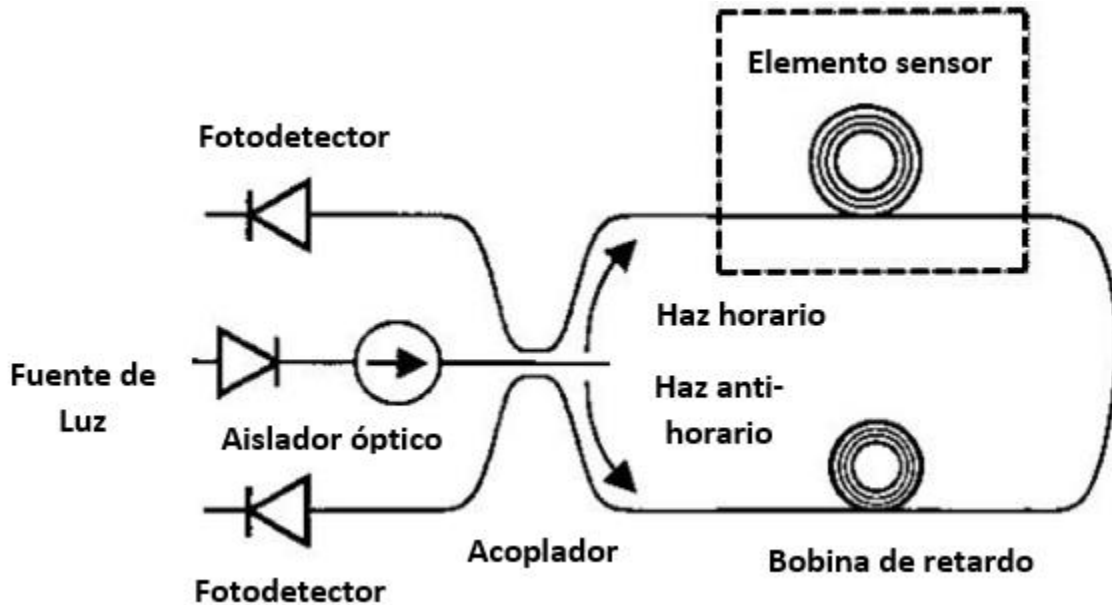


**Figura 1.13.** Esquema básico de un interferómetro de Sagnac [8].

El interferómetro de Sagnac de fibra óptica, como cualquier interferómetro de Sagnac detecta simplemente la velocidad de rotación. De hecho, detecta cualquier fenómeno no recíproco que se produce cuando la luz atraviesa la bobina de fibra. Como resultado de ello, este interferómetro encontró aplicaciones en la detección de corriente (rotación de Faraday) y en detectores acústicos dinámicos como por ejemplo los hidrófonos. Como se ha descrito el interferómetro de Sagnac; es sensible a perturbaciones asimétricas transitorias, de tal forma que una perturbación

dinámica que ocurre en un extremo de la bobina de fibra óptica cambia el intervalo de tiempo entre la llegada de los haces en propagación contraria y por lo tanto introducir una no reciprocidad.

Aprovechando este fenómeno, se puede realizar una pequeña modificación para emplearlo en un sistema de detección útil, es decir, cubriendo la mitad de la bobina del campo físico de interés y exponiendo la otra parte [23]. Para ejemplificar en la figura 1.14 se muestra el diagrama de un hidrófono de fibra óptica basado en un interferómetro de Sagnac, donde la bobina que conforma al elemento sensor es expuesta al campo acústico, mientras la bobina de retardo permanece fuera de este.



**Figura 1.14.** Diagrama de un hidrófono en fibra basado en interferómetro Sagnac [8].

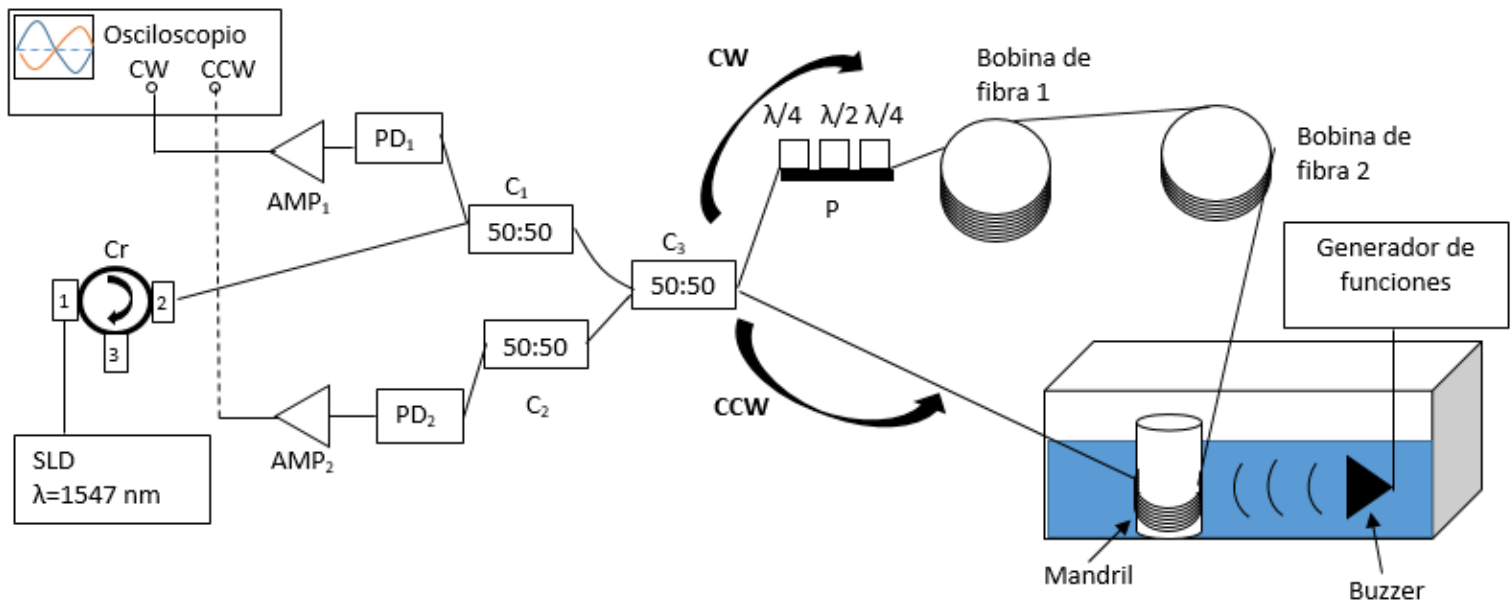
Una de las ventajas de utilizar este interferómetro sobre otros esquemas como Mach-Zehnder o Michelson, es que se elimina el ruido de fase inducido por la fuente. Se ha mostrado que el interferómetro de Sagnac es menos susceptible al ruido ambiental, ha mejorado las propiedades fundamentales del ruido térmico y es inmune al ruido de fase del láser. La desventaja es su baja responsividad para bajas frecuencias, a menos que la longitud de fibra que comprende la bobina sea muy larga. Sin embargo, puede ser conveniente para altas frecuencias en el rango de los megahertz [24].

## Capítulo 2. Montaje experimental

En este capítulo se presenta la configuración del hidrófono en fibra óptica propuesto, los elementos que lo conforman y el principio de operación para la detección de ondas acústicas. Además se describen los experimentos realizados para el caso de ondas continuas, así como el caso de un pulso, para caracterizar al sensor en función de la frecuencia y de la distancia a la que se encuentra la fuente alejada del receptor (mandril) comparando dos diferentes mandriles constituidos de diferente material, diámetro y espesor.

### 2.1. Hidrófono en fibra óptica propuesto

En la figura 2.1, se muestra un esquema del hidrófono en fibra óptica propuesto que basa su funcionamiento en el interferómetro de Sagnac. Está conformado por un diodo superluminiscente (SLD) centrado a una longitud de onda de 1547 nm y una potencia de 22.2 mW, dos acopladores 1x2 ( $C_1$  y  $C_2$ ) con una tasa de acoplamiento de 50:50, un acoplador de 2x2 ( $C_3$ ) con una tasa de acoplamiento 50:50, un polarizador de 3 platos de polarización ( $\frac{\lambda}{4}, \frac{\lambda}{2}$  y  $\frac{\lambda}{4}$ ), dos bobinas de fibra óptica monomodal (SMF-28) de 100 m y 80 m (bobina 1 y 2 respectivamente) encargadas de producir un retardo de la señal (cabe aclarar que las dos bobinas de fibra óptica pueden ser sustituidas por una sola bobina de fibra óptica de 180 m), el elemento de detección (mandril), dos fotodiodos ( $PD_1$  y  $PD_2$ ) y dos amplificadores operacionales TL082 ( $AMP_1$  y  $AMP_2$ ).



**Figura 2.1.** Esquema del hidrófono en fibra óptica propuesto.

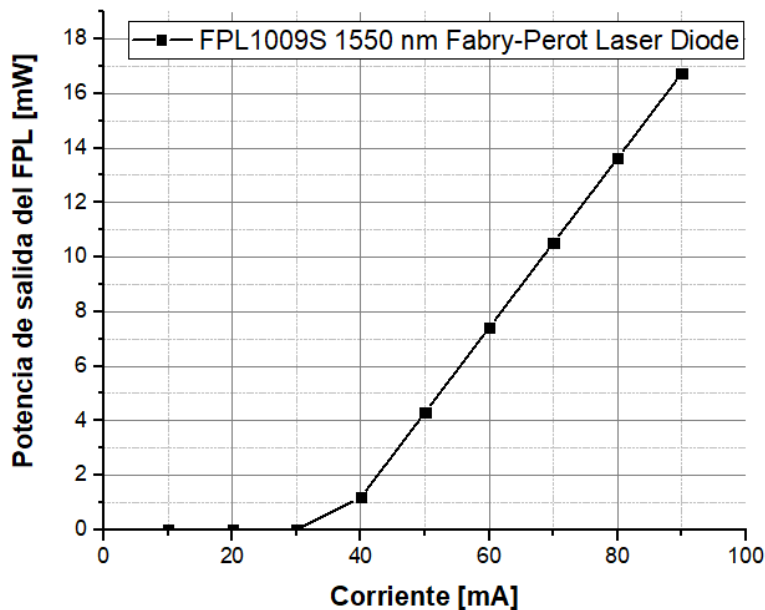
Para generar las ondas acústicas se utilizó un buzzer (este dispositivo consiste de un delgado diafragma piezoeléctrico que vibra cuando se le aplica una señal eléctrica [5]) que es alimentado por un generador de funciones Agilent 33521A.

### 2.1.1. Elección de la fuente óptica

Se realizó una comparación entre las señales detectadas por los fotodetectores de dos diferentes fuentes, un diodo superluminiscente y un láser Fabry-Perot (FPL), determinando cuál de ellas es más adecuada a utilizar en el sistema, en [25] y [26] se encuentra respectivamente la hoja de datos de cada una de las fuentes.

De acuerdo a la hoja de especificaciones del SLD la potencia óptica de salida máxima es de 22.2 mW. Sin embargo, al verificar este valor con un medidor de potencia óptica marca ILX lightwave, se obtuvo una potencia aproximada de 5 mW. Cabe mencionar que el detector es colocado directamente a la salida de la fuente sin atravesar ningún segmento de fibra óptica o algún medio que atenúe la señal.

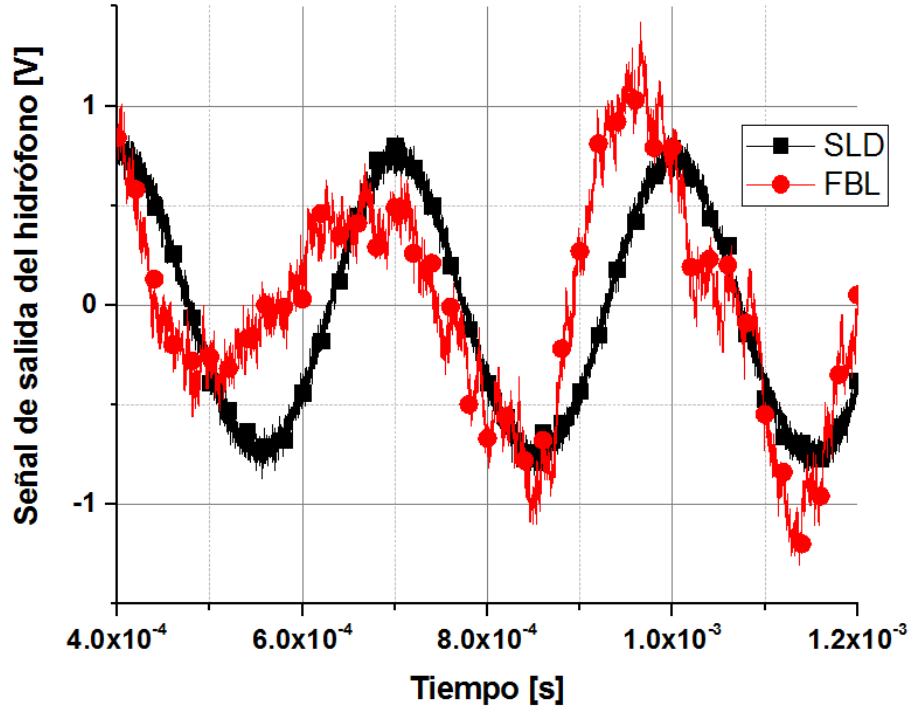
Posteriormente se realizó la caracterización del FPL con el medidor de potencia óptica y de esta manera asegurar que la potencia de salida entregada por esta fuente, fuera aproximadamente igual a la de la SLD (5 mW). Realizando un barrido de la corriente suministrada al láser a incrementos de 10 mA, se determina que a una corriente de aproximadamente 52 mA se obtiene el valor de potencia óptica buscado, tal y como se observa en la figura 2.2.



**Figura 2.2.** Caracterización de la potencia de salida del láser Fabry-Perot en función de la corriente suministrada.

Una vez establecidos los parámetros que permiten tener una potencia óptica de salida similar para ambos casos, se conecta una de las fuentes al resto del sistema que conforma el hidrófono propuesto y es aplicada una perturbación acústica con una señal sinusoidal de 3.35 kHz de frecuencia y una amplitud de 2 V<sub>pp</sub>.

De la comparación de las señales obtenidas para cada una de las fuentes, se observa en la figura 2.3, que la señal del FPL presenta más ruido y es más inestable que la señal del SLD, tal y como lo sugiere [7], por esta razón el SLD fue utilizado como fuente del hidrófono para el resto de los experimentos.



**Figura 2.3.** Comparación de la señal de salida del hidrófono con diferentes fuentes. a) Diodo super-luminiscente. b) Láser Fabry-Perot.

### 2.1.2. Principio de operación

Para comprender el funcionamiento del interferómetro de Sagnac mostrado en la figura 2.1, se describen a continuación la interacción del haz de luz con los elementos que componen el sistema.

El haz de salida del diodo super-luminiscente (SLD) a una potencia de 5 mw (medida) pasa primero por un circulador que tiene la función de proteger la fuente. Posteriormente al llegar al acoplador  $C_3$  es dividido en dos haces, uno de los haces se propaga en sentido horario (CW) pasando por las dos bobinas de retardo y después por el elemento sensor (mandril), mientras el otro haz realiza su recorrido de forma inversa pasando primero por el mandril y posteriormente por las bobinas de retardo, es decir, en sentido anti-horario (CCW).

Durante el tiempo de retardo entre la llegada del haz con propagación horaria y anti-horaria al mandril, la señal acústica induce un cambio en la modulación de fase en el hidrófono. Este cambio en modulación de fase es mapeado como una diferencia de fase entre los haces en propagación contraria, que es convertida a su vez en una modulación de intensidad cuando los haces son recombinados en el acoplador 2x2 [27]. Dicho de otro modo, si una señal acústica de frecuencia  $\omega$  induce una modulación de fase  $A \cdot \cos(\omega t)$  en el hidrófono, la modulación de fase resultante entre los haces que interfieren en el hidrófono  $A_h(t)$  está dada por:

$$A_h(t) = A_{CW} \cos(\omega t) - A_{CCW} \cos(\omega(t + T_{delay})), \quad (2.1)$$

donde  $T_{delay}$  es el tiempo de retardo entre la llegada de los haces con propagación horaria y anti-horaria.  $A_{CW}$  y  $A_{CCW}$  son las amplitudes de los haces detectados en sentido horario y anti-horario respectivamente. Por tanto la amplitud de  $A_h(t)$  es una función de la modulación de la frecuencia acústica con el tiempo de retardo de los haces. Entonces, la diferencia máxima se logra en el sensor de Sagnac cuando el producto  $\omega T_{delay}$  es un múltiplo impar de  $\pi$ , en donde la frecuencia acústica que hace este producto exactamente  $\pi$  es denominada como la frecuencia propia de la bobina.

### 2.1.3. Obtención de la señal de salida del hidrófono

Una vez que los haces son recombinados en el acoplador  $C_3$  son colocados dos fotodiodos pigtail (InGaAs) en cada uno de los puertos de los acopladores  $C_1$  y  $C_2$  para poder detectar la amplitud de las señales de luz de cada uno de ellos, de tal forma que el fotodiodo  $PD_1$  se encarga de detectar el haz en sentido horario y el fotodiodo  $PD_2$  para el haz anti-horario (ver figura 2.1).

Los dos fotodiodos  $PD_1$  y  $PD_2$  son polarizados en inversa (modo foto-conductivo) a 12 V, con una resistencia de carga de 10 k $\Omega$  que nos permite medir el voltaje correspondiente a cada señal, posteriormente la señal de salida pasa por un filtro paso altas RC para suprimir la componente DC y finalmente es amplificado con una ganancia de 1000 utilizando el amplificador operacional TL082 en una configuración no inversora. Cabe mencionar que a pesar de utilizar los mismos valores nominales de los componentes electrónicos para el acondicionamiento de la señal, el haz en sentido horario tiene una mayor amplitud que el otro haz.

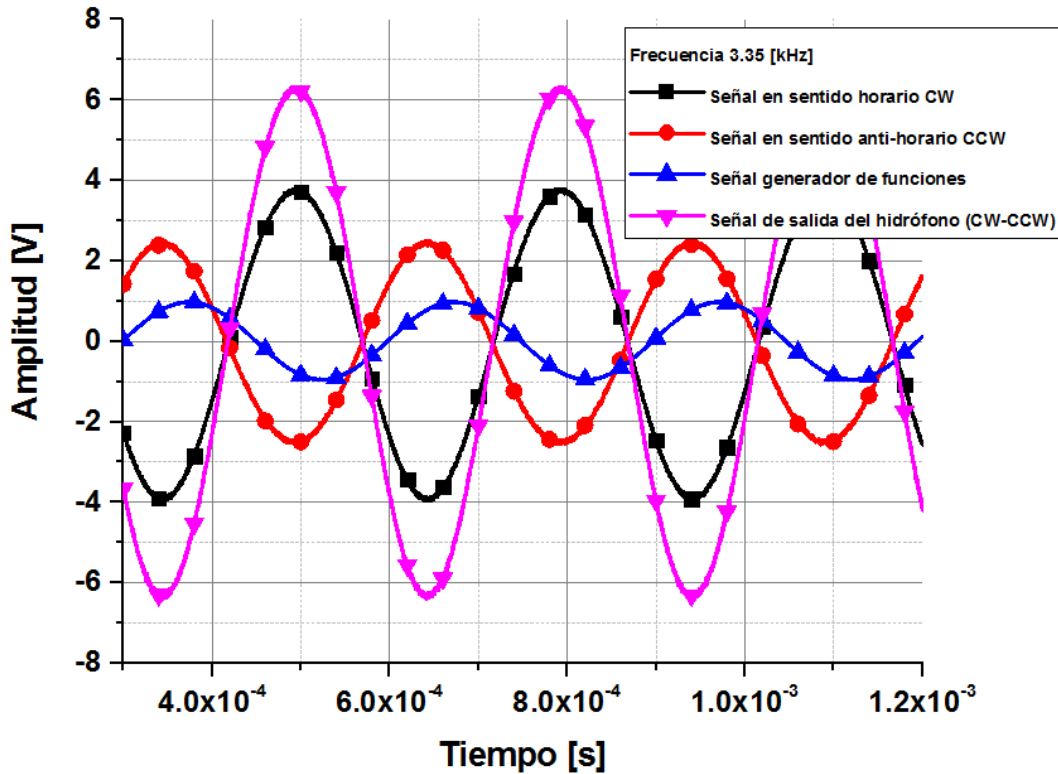


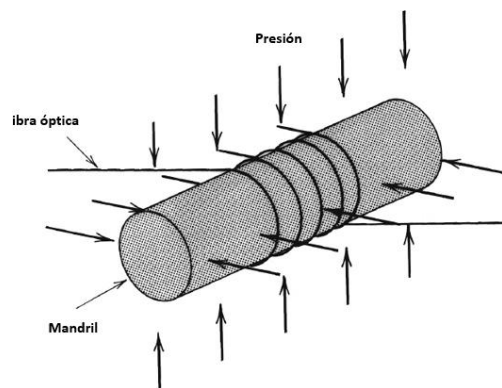
Figura 2.4. Señales obtenidas en el osciloscopio para una frecuencia de 3.35 kHz.

En la figura 2.4, se muestra un ejemplo de las señales visualizadas en el osciloscopio Tektronix 3034 C. Las señales obtenidas en todos los experimentos son: la señal de referencia de  $2 V_{pp}$  (señal con la que excitado el buzzer), la señal del haz en sentido horario (amplificada 1000 veces), la señal del haz en sentido anti-horario (amplificada 1000 veces) y la señal de salida del hidrófono (CW-CCW) que es generada a partir de la operación de resta de la función “MATH” del osciloscopio, es decir, esta señal es el resultado de la diferencia de fases entre los haces que se propagan en direcciones opuestas.

#### 2.1.4. Elaboración del elemento de detección (mandril)

En los hidrófonos de fibra óptica de tipo interferométrico, el cambio en fase de la luz es proporcional a la tensión producida por el estiramiento o compresión de la fibra óptica por las ondas acústicas. La sensibilidad de fase es el parámetro más importante del elemento sensor, la cual depende de varios factores como módulo de Young (resistencia de un material a la deformación elástica), coeficiente de Poisson (cociente entre las deformaciones laterales y axiales de un material), material, estructura y longitud de fibra que conforma al elemento de detección. La propia fibra óptica de vidrio de sílice no suele ser sensible a onda acústicas, debido a que su módulo de Young es muy grande y su sensibilidad de fase es muy limitada, por esta razón se han desarrollado varios diseños de mandril para incrementar la sensibilidad.

El mandril es un segmento fibra óptica enrollada en un cilindro hueco que puede contener en su interior aire o ser rellenado con espuma, por lo general los mandriles están hechos de plástico sólido, metal o plástico con aire en el interior del cilindro. En un mandril sólido, la fibra se enrolla bajo tensión sobre un cilindro de polímero sólido tal como nylon o teflón. Su sensibilidad es proporcional al recíproco del módulo de Bulk (presión requerida para producir un cambio de unidad en el volumen del material, medido en kPa) del material. En un mandril con aire en su interior, se podría proporcionar sustancialmente mayor sensibilidad, sin embargo, su sensibilidad podría verse afectada por la presión hidrostática y, por tanto, depender de la profundidad [28].



**Figura 2.5.** Diagrama de un mandril de fibra óptica [29].

En la figura 2.5 se muestra una configuración de un mandril, en el que la fibra óptica se enrolla firmemente alrededor del cilindro y así mide la deformación radial del

cilindro inducida por el campo acústico. La tensión en la fibra está directamente relacionada con la deformación radial desarrollada en el mandril y está dada por:

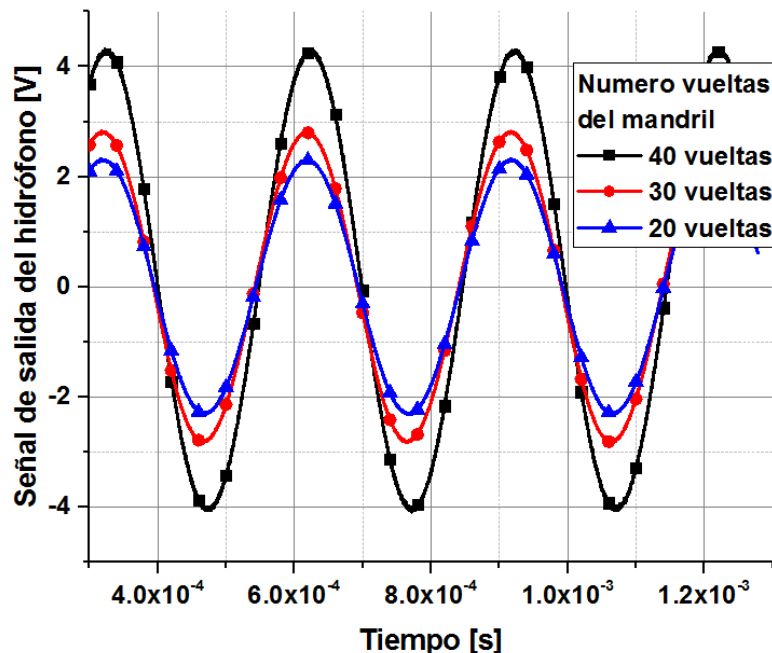
$$\frac{dr}{r} = \frac{-P}{3B}, \quad (2.2)$$

donde  $P$  es la presión,  $r$  es el radio del mandril y  $B$  es el módulo de Bulk. Por lo tanto, la respuesta acústica normalizada del mandril está dada por:

$$\frac{d\phi}{\phi \times dP} = \frac{-\xi}{3B} \quad (2.3)$$

Donde  $\xi$  es el factor de corrección de la tensión óptica (típicamente tiene un valor de  $\sim 0.78$  en fibras de vidrio de silicio) [29]. En virtud de las variaciones entre las dimensiones del mandril y el número de vueltas del embobinado, es capaz de derivar diferencias en la intensidad de la señal, el rango dinámico y la sensibilidad [30].

Para las pruebas realizadas se propusieron dos mandriles huecos, de diferente material y diámetro. El primero de ellos se utilizó un cilindro de aluminio con medidas de 15.6 cm alto, 0.13 mm de espesor y un diámetro externo de 5.65 cm. El número de vueltas que conforma la bobina se varió de 20 a 40 vueltas para determinar si la sensibilidad aumentaba al tener mayor número de espiras. En la figura 2.6, se muestran que para 40 vueltas se tiene la mayor amplitud. La señal de excitación del buzzer para generar la perturbación en el mandril es una onda sinusoidal de 3.35 kHz de frecuencia y una amplitud de 2 V<sub>pp</sub>.



**Figura 2.6.** Señal de salida del hidrófono en función del número de espiras que conforma el mandril de aluminio.

El segundo material utilizado fue un cilindro de vidrio, constituido por una combinación de arena de cuarzo, óxido de metal, cal y potasa fundidos a 1500 °C.



Las dimensiones del vaso son 15.8 cm de alto, 1.02 mm de espesor y un diámetro externo de 6.55 cm. Para tener una comparación de la sensibilidad de este material con respecto al cilindro de aluminio, se realizó un embobinado de 34 vueltas de fibra que equivale al segmento de fibra en donde se obtuvo mayor amplitud del caso anterior (40 vueltas  $\approx$  2.26 m).

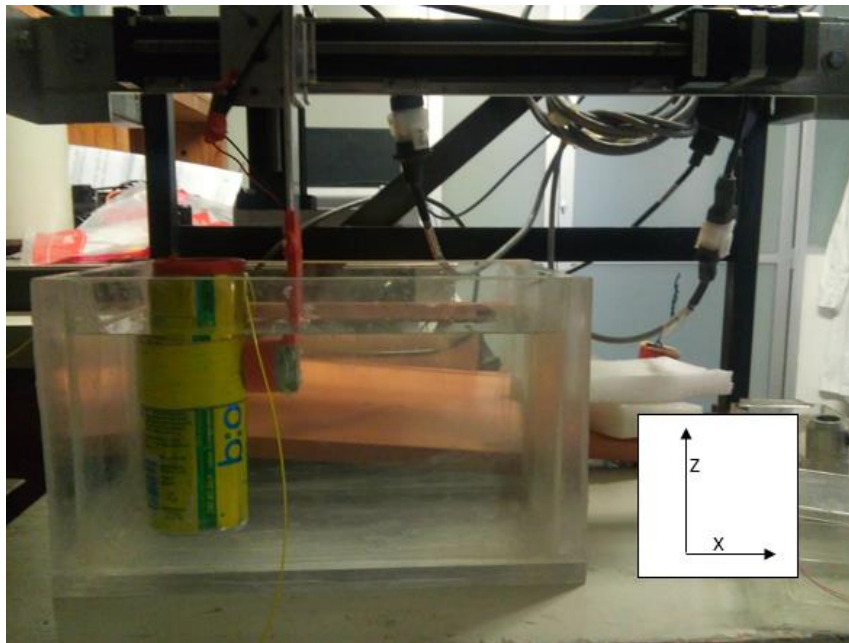
## 2.2. Pruebas con una señal de excitación sinusoidal continua

En la siguiente sección se describe detalladamente cada una de las pruebas que se realizaron para caracterizar el hidrófono tanto para el mandril de aluminio y el mandril de vidrio.

### 2.2.1. Barrido en frecuencia para el mandril de aluminio

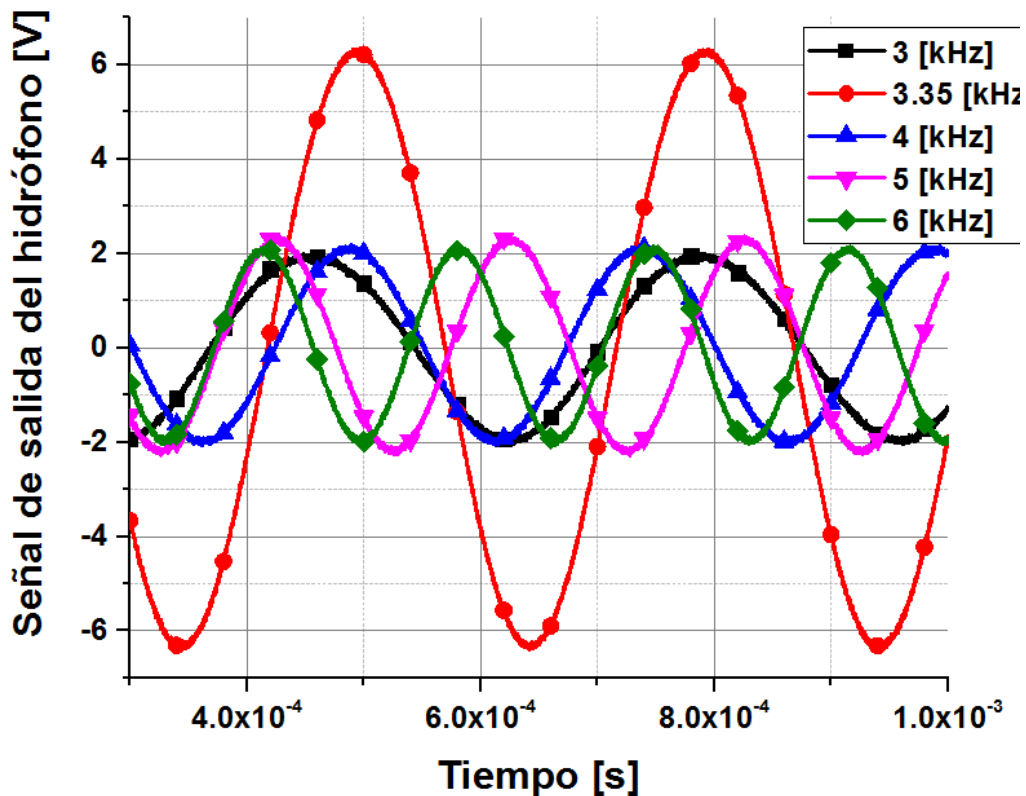
En un tanque de acrílico de 27.6 cm de largo, 17.6 cm de ancho y 16.3 cm de alto, se coloca el mandril de aluminio con un embobinado de 40 vueltas. Cada una de las espiras que conforma el sensor se cubre con agua, es decir, la frontera exterior del mandril este cubierto por agua mientras el interior contiene aire del ambiente.

Para caracterizar el mandril en función de la frecuencia se sumergió la fuente acústica (buzzer) en el tanque de pruebas, se aísla con un globo y se monta sobre una barra de aluminio sujeta sobre un sistema de posicionamiento mecánico de dos ejes XZ, basado en dos motores a paso marca Velmex con una resolución de  $2.5 \mu\text{m}$  por paso, se alinea aproximadamente hacia el centro de las espiras y se acerca hacia el mandril. Los motores son controlados mediante un driver y software de la misma marca, conectado vía USB a la PC y con una serie de comandos se establece el número de pasos desplazados para cada motor. En la figura 2.7 se observa el montaje experimental del sistema de posicionamiento mecánico con el que es alineado el buzzer con el mandril de aluminio.



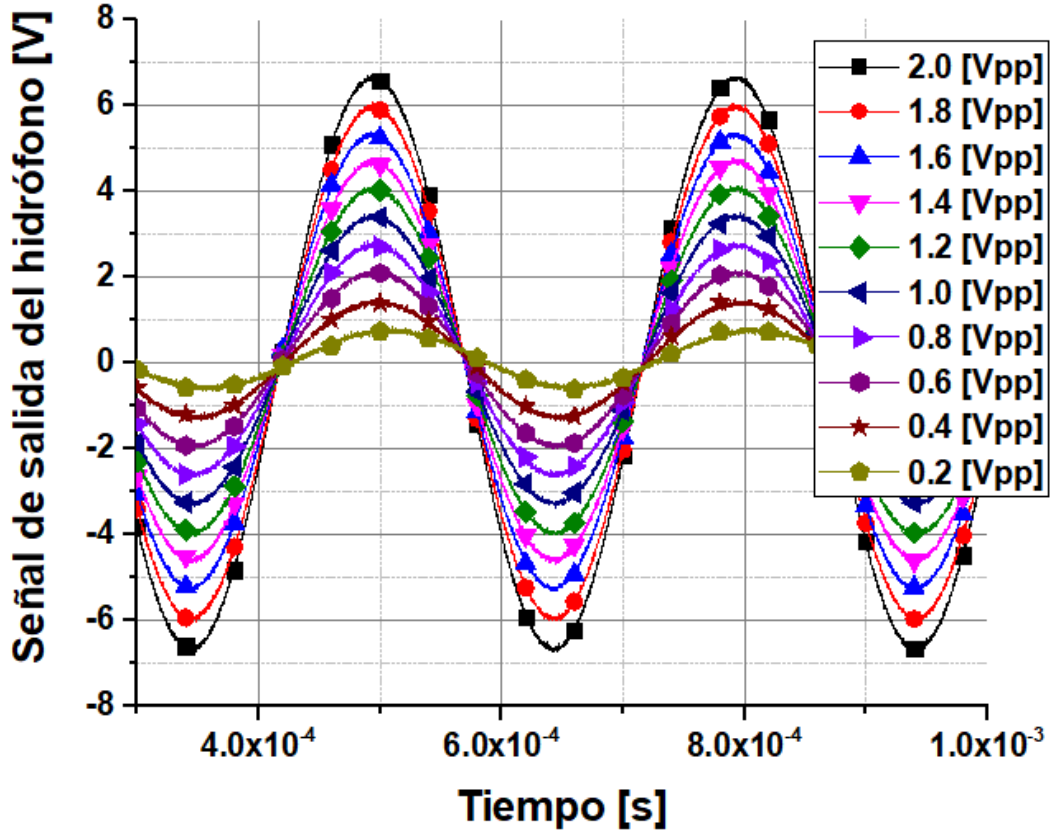
**Figura 2.7.** Sistema de posicionamiento mecánico en los ejes XZ, alineación del buzzer con el mandril de aluminio.

La forma de onda utilizada fue una señal sinusoidal continua con una amplitud de  $2 V_{pp}$ , realizando un primer barrido en frecuencia de 3 kHz hasta 9 kHz con intervalos de 1 kHz, identificando que el rango de frecuencias de 3 a 6 kHz se encontraba la señal de mayor amplitud. Un segundo barrido se realiza sobre ese rango a incrementos de 10 Hz para detectar la frecuencia de resonancia del sistema. En la figura 2.8, se muestran las señales de mayor amplitud detectadas por el hidrófono, observando que en la frecuencia de 3.35 kHz se tiene la máxima amplitud con respecto a las demás, es decir, la frecuencia de resonancia.



**Figura 2.8.** Barrido en frecuencia del mandril de aluminio excitando el buzzer con una señal sinusoidal continua de  $2 V_{pp}$ .

Una vez que se determinó que la frecuencia de resonancia es de 3.35 kHz, se mantuvo fija la frecuencia y se realizó la caracterización en función de la tensión de alimentación de la fuente acústica. Comenzando con una señal sinusoidal con una tensión de  $0.2 V_{pp}$ , se incrementó su amplitud a razón de  $0.2 V_{pp}$  hasta obtener la respuesta máxima de la señal de salida del hidrófono sin alcanzar la saturación del fotodiodo, en la figura 2.9 se puede observar que esto ocurre cuando la tensión de alimentación del buzzer es de  $2 V_{pp}$ , cabe mencionar que para el resto de las frecuencias se puede incrementar la tensión de alimentación del buzzer, ya que las señales son de menor amplitud y no saturan el fotodiodo. Ante esta posibilidad se aumentó la tensión a  $20 V_{pp}$  y se realiza un barrido de 10 kHz hasta determinar la frecuencia máxima de detección del sensor, alcanzando una frecuencia de 30 kHz.



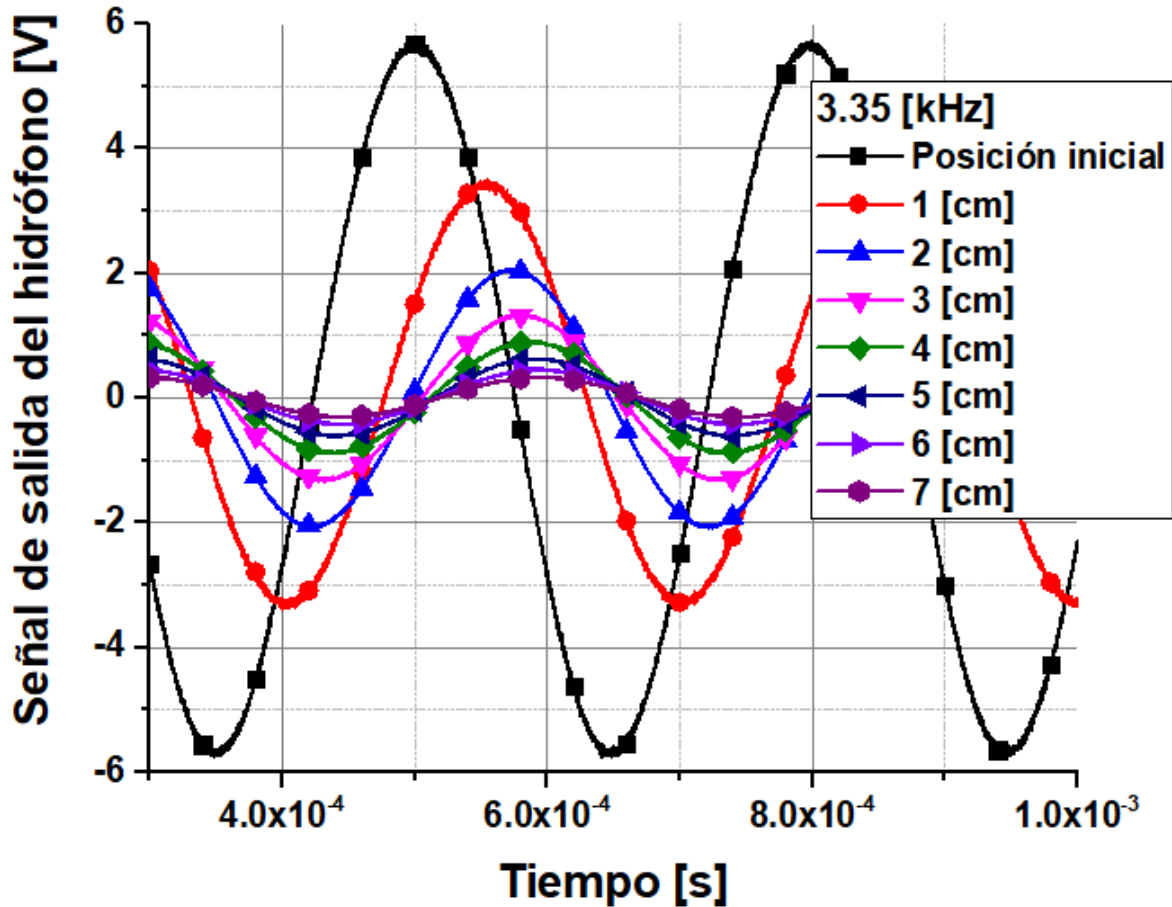
*Figura 2.9. Barrido de la tensión de alimentación del buzzer a una frecuencia de 3.35 kHz para el mandril de aluminio.*

### 2.2.2. Separación entre la fuente y el mandril de aluminio

Para determinar la separación entre la fuente acústica y el sensor, primero fue alineado el mandril con el buzzer en el tanque de pruebas, de tal forma que el buzzer quede frente al embobinado de 40 vueltas de fibra óptica y este lo más cerca posible. Con una señal sinusoidal a la frecuencia de resonancia (3.35 kHz) y la amplitud máxima para no saturar el fotodiodo (2 V<sub>pp</sub>) se obtiene la señal de referencia que corresponde a la señal de la posición inicial, los datos mostrados en el osciloscopio son almacenados vía USB para su futuro análisis.

Una vez que se tiene la referencia, mediante el sistema de posicionamiento de motores a pasos es alejada la fuente en la dirección X a intervalos de distancia de 1 cm (4000 pasos) hasta estar alejada del sensor 7 cm. Para evitar que el movimiento del agua producido por el desplazamiento de los motores afecte en los resultados, se espera alrededor de 1 minuto entre cada uno de las mediciones para almacenar las señales de salida del hidrófono.

A continuación en la figura 2.10, se muestran las señales detectadas por el sensor para cada una de las distancias de separación entre la fuente y el mandril de aluminio, observando que las señales son atenuadas y desplazadas a la derecha a medida que se incrementa la distancia a la que se encuentra la fuente del mandril de aluminio.



*Figura 2. 10. Señal de salida del hidrófono en función de la distancia entre el buzzer y el mandril de aluminio aplicando una señal sinusoidal continua.*

### **2.2.3. Barrido en frecuencia para el mandril de vidrio**

El mandril de aluminio es sustituido por un mandril de vidrio conformado de 35 vueltas de fibra óptica, que es tratado bajo las mismas condiciones para compararlo con el mandril de aluminio, es decir, se hace un primer barrido de 3 kHz hasta 9 KHz a incrementos de 1 kHz, se determina las frecuencias de mayor amplitud para posteriormente realizar un barrido más pequeño (10 Hz) y de este modo obtener la frecuencia de resonancia. Como se observa en la figura 2.11, la frecuencia de resonancia para esta cabeza de detección es de 3.35 kHz como en el caso anterior. Sin embargo, las amplitudes detectadas para esta frecuencia decaen considerablemente con respecto a las obtenidas con el mandril de aluminio, de tal forma que para este mandril la saturación del fotodiodo no ocurre con una tensión de alimentación de  $2 V_{pp}$ . Sin embargo, para tener una comparación de los mandriles en la figura 2.12 se muestra el barrido en tensión de alimentación de  $0.2 V_{pp}$  hasta  $2 V_{pp}$ . Para este caso también se aumenta la amplitud de la señal de excitación a  $20 V_{pp}$  y se realiza el barrido desde 10 kHz, determinando que la frecuencia máxima de detección bajo estas condiciones es de 30 kHz.

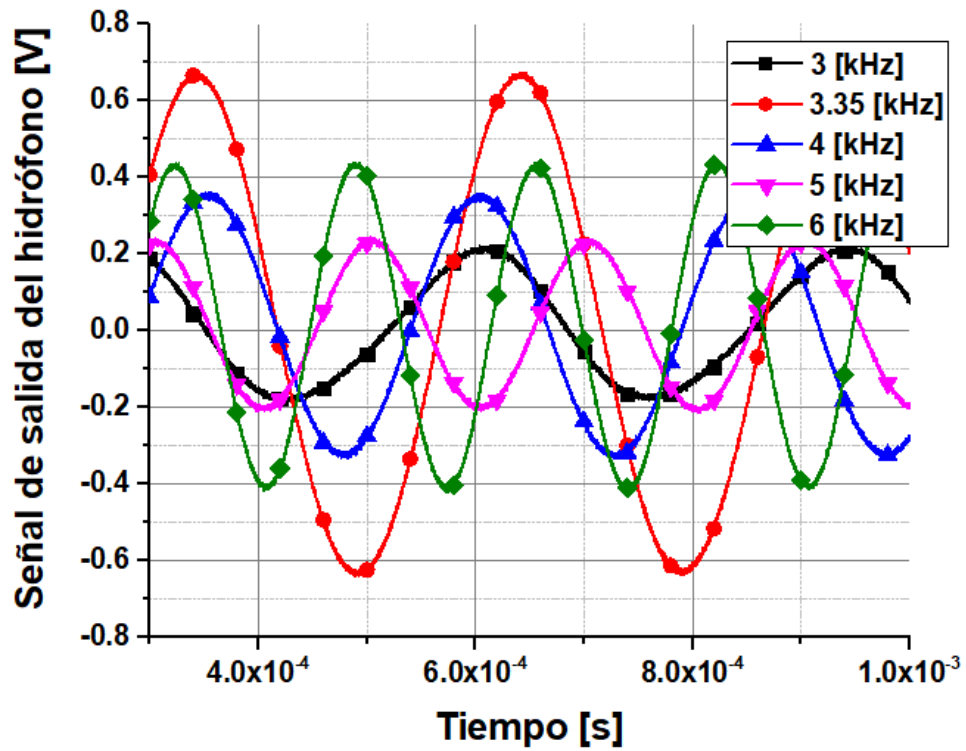


Figura 2. 11. Barrido en frecuencia excitando el buzzer con una señal sinusoidal continua de  $2 V_{pp}$  para el mandril de vidrio.

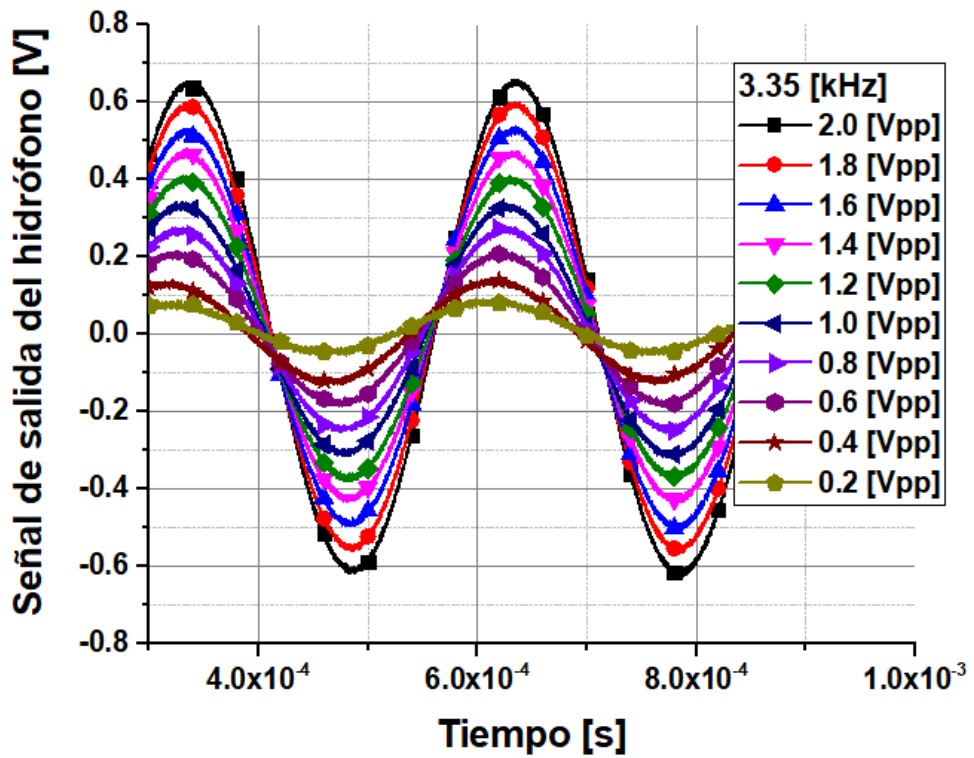
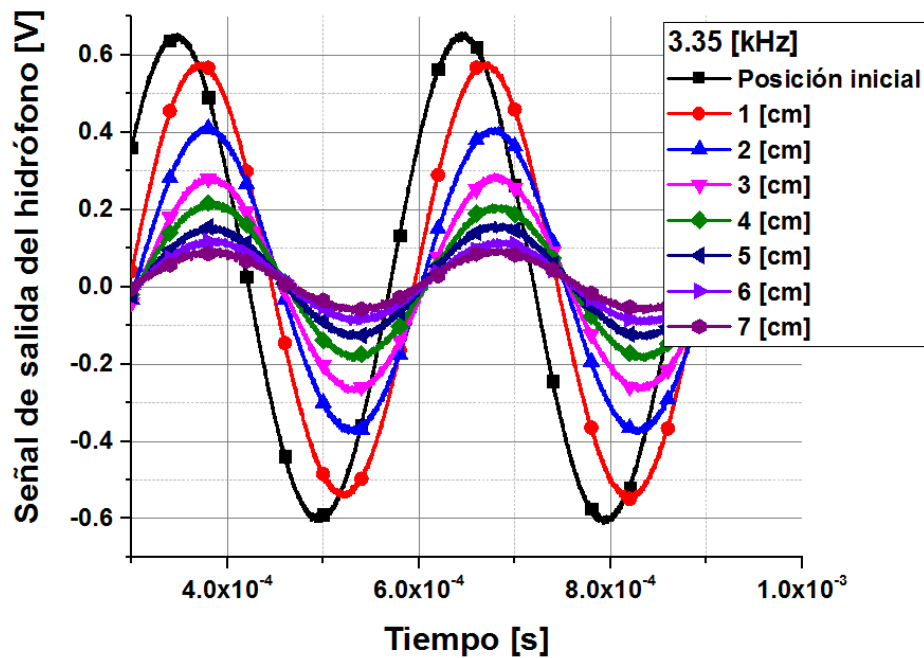


Figura 2. 12. Barrido de la tensión de alimentación del buzzer a una frecuencia de 3.35 kHz para el mandril de vidrio.

#### 2.2.4. Separación entre la fuente y el mandril de vidrio



**Figura 2.13.** Señal de salida del hidrófono en función de la distancia entre el buzzer y el mandril de vidrio aplicando una señal sinusoidal continua.

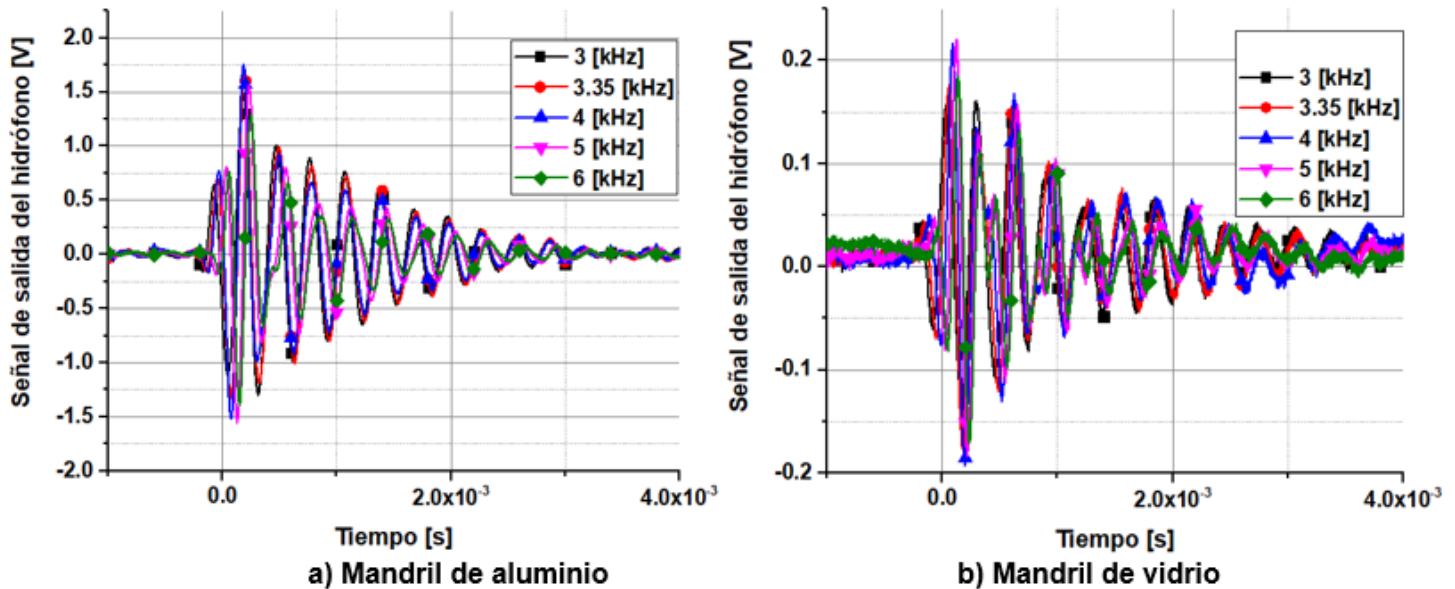
En la figura 2.13 se muestra las señales de salida para cada una de las distancias a las que se encuentra separado el buzzer del mandril de vidrio al excitar la fuente acústica con una señal sinusoidal continua de  $2 V_{pp}$  y una frecuencia de 3.35 kHz. Cabe resaltar que la atenuación del sensor fue menor que la del mandril de aluminio ya que a pesar de que la señal detectada en este caso es mucho menor, el mandril de vidrio es capaz de medir la señal a la misma distancia de separación, es decir, a 7 cm de distancia.

### 2.3. Pruebas con una señal de excitación en sinusoidal pulsada

La caracterización del sensor con una señal de pulsada se realizó configurando el generador de funciones con una forma de onda sinusoidal de un ciclo, con una amplitud de  $2 V_{pp}$  y un periodo de repetición del pulso de 15 ms.

#### 2.3.1. Barrido en frecuencia

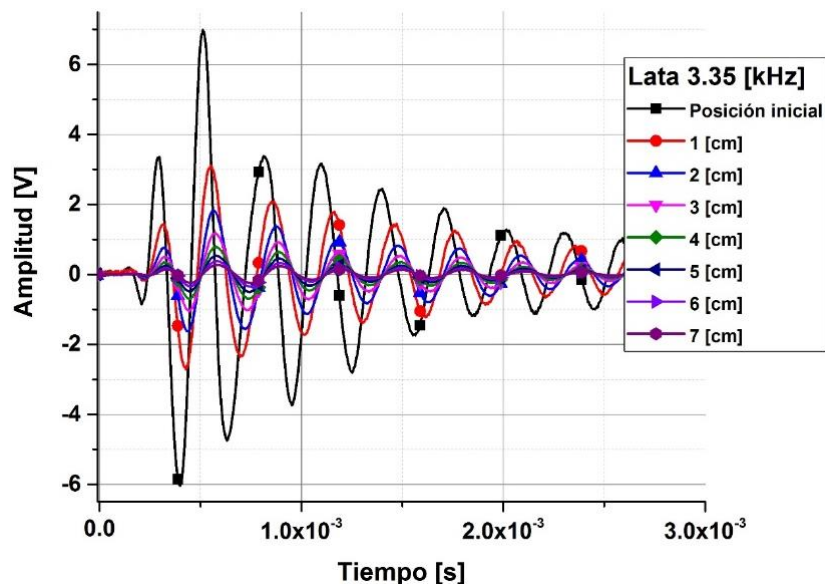
A continuación, se muestra en la figura 2.14 la comparación de las señales de mayor amplitud obtenidas tanto del mandril de aluminio como del mandril de vidrio para un barrido de frecuencias de 3 kHz a 9 kHz, tal y como se hizo para la caracterización en señal continua. Sin embargo, para la señal pulsada no se aprecia la frecuencia de resonancia como en el otro caso.



**Figura 2. 14.** Barrido en frecuencia con una señal de excitación sinusoidal pulsada de 2 V<sub>pp</sub>. a) Mandril de aluminio, b) Mandril de vidrio.

### 2.3.2. Separación entre la fuente y el sensor

Considerando que las señales detectadas al aplicar un campo acústico con una amplitud de 2 V<sub>pp</sub> son pequeñas para ambos mandriles y que la atenuación de la señal dificultaría la medición hasta 7 cm, se incrementó la amplitud a 20 V<sub>pp</sub> ya que los fotodiodos no se saturan con esta amplitud. Este experimento consistió en alejar la fuente del mandril desde su posición inicial (≈0 cm de distancia entre la fuente y el receptor) hasta una distancia de 7 cm. Las frecuencia con las que fue excitada la fuente fue de 3.35 kHz para ambos mandriles.



**Figura 2. 15.** Desplazamientos de la posición de la fuente acústica con respecto al mandril de aluminio empleando onda pulsada de 3.35 kHz.

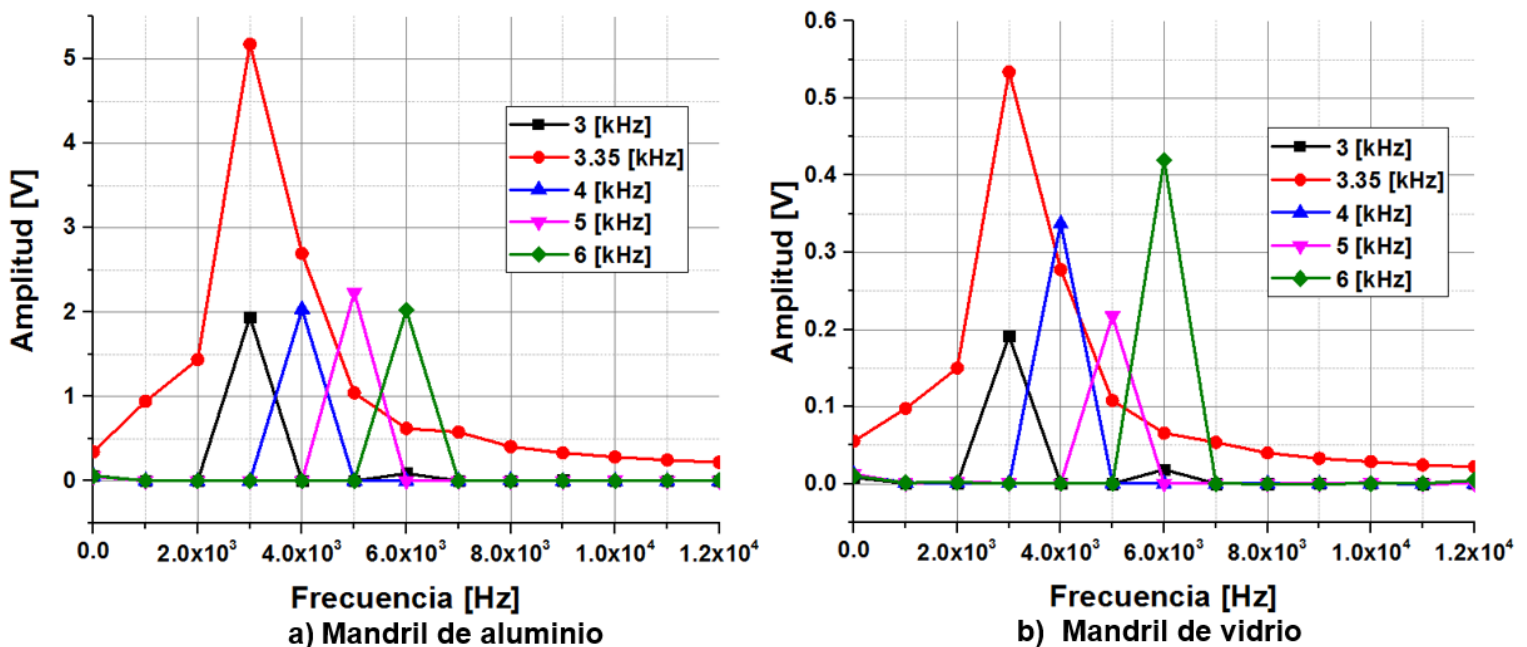
## Capítulo III. Análisis de resultados

En este capítulo se realizó una interpretación de los datos de las señales obtenidas con los dos mandriles. Realizando un análisis de la atenuación y desplazamiento de la señal a medida que es alejada la fuente del mandril. Además mediante la transformada rápida de Fourier se determinan si las componentes de frecuencias medidas por el sensor corresponden a las frecuencias de excitación del buzzer. Por otro lado, se realiza una correlación de las presiones calculadas con el sonómetro, para establecer una relación del voltaje medido con nuestro sistema.

### 3.1. Análisis espectral

#### 3.1.1. Espectros en frecuencia de la señales con una excitación continua

Para realizar el análisis en frecuencia se utilizó el software OriginPro 2016 obteniendo los espectros de las señales descritas en el capítulo dos. En la figura 3.1, se muestra la comparación de los espectros para los dos mandriles, verificando en ambos casos, que la componente con mayor amplitud y ancho espectral tiene una frecuencia de 3.35 kHz (resonancia). Además, se observa que el sensor es capaz de detectar el resto de las componentes en frecuencias (3-6 kHz) con la que es excitado el buzzer.



**Figura 3.1.** Análisis espectral de las señales detectadas por el hidrófono para un rango de frecuencias de 3-6 kHz, a) Mandril de aluminio b) Mandril de vidrio.

El sensor es capaz de detectar señales de baja amplitud ( $\approx 0.03 V_{pp}$ ) en el rango de frecuencias que comprende al ultrasonido ( $>20$  kHz). Sin embargo, para lograrlo fue necesario aplicar una señal acústica muy grande ( $20 V_{pp}$ ) y que el sensor estuviera muy cercano a la fuente (ver figura 3.2).



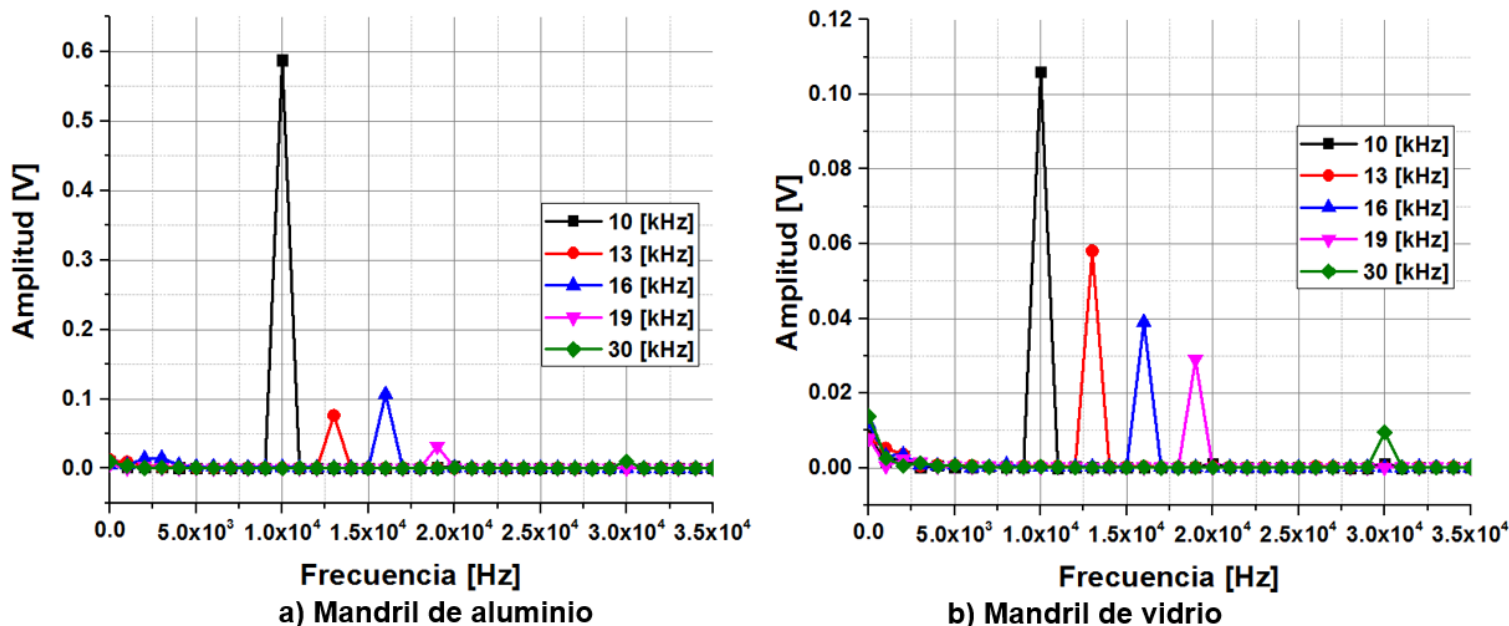


Figura 3.2. Análisis espectral de las señales detectadas por el hidrófono para un rango de frecuencias de 10-30 kHz, a) Mandril de aluminio b) Mandril de vidrio.

### 3.1.2. Espectros en frecuencia de las señales con una excitación pulsada

De los espectros en frecuencia mostrados en la figura 3.3, se puede observar que del barrido de frecuencia aplicada al buzzer, las dos componentes detectadas en ambos mandriles son de 3.375 kHz (cerca a la frecuencia de resonancia para onda continua) y una componente de 5.753 kHz. Sin embargo, en el mandril de vidrio se logran apreciar otras componentes de baja frecuencias en un rango de 400-600 kHz.

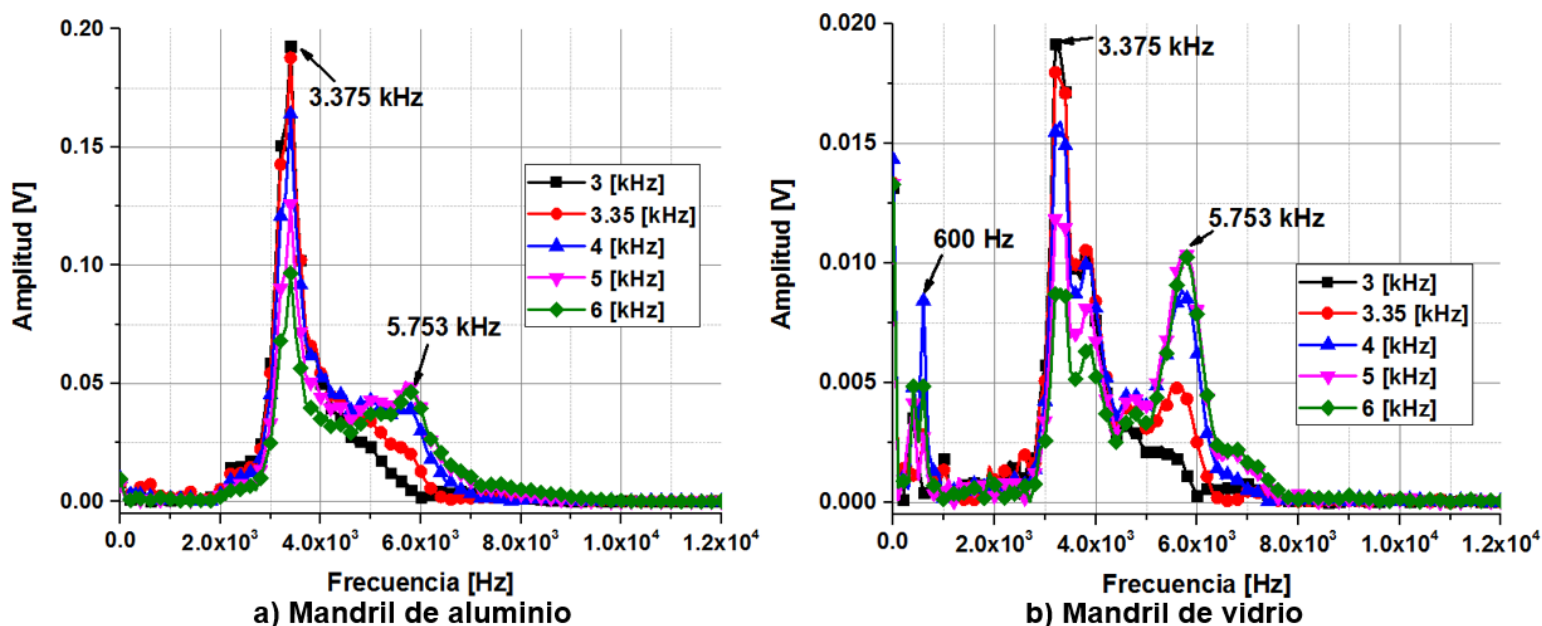
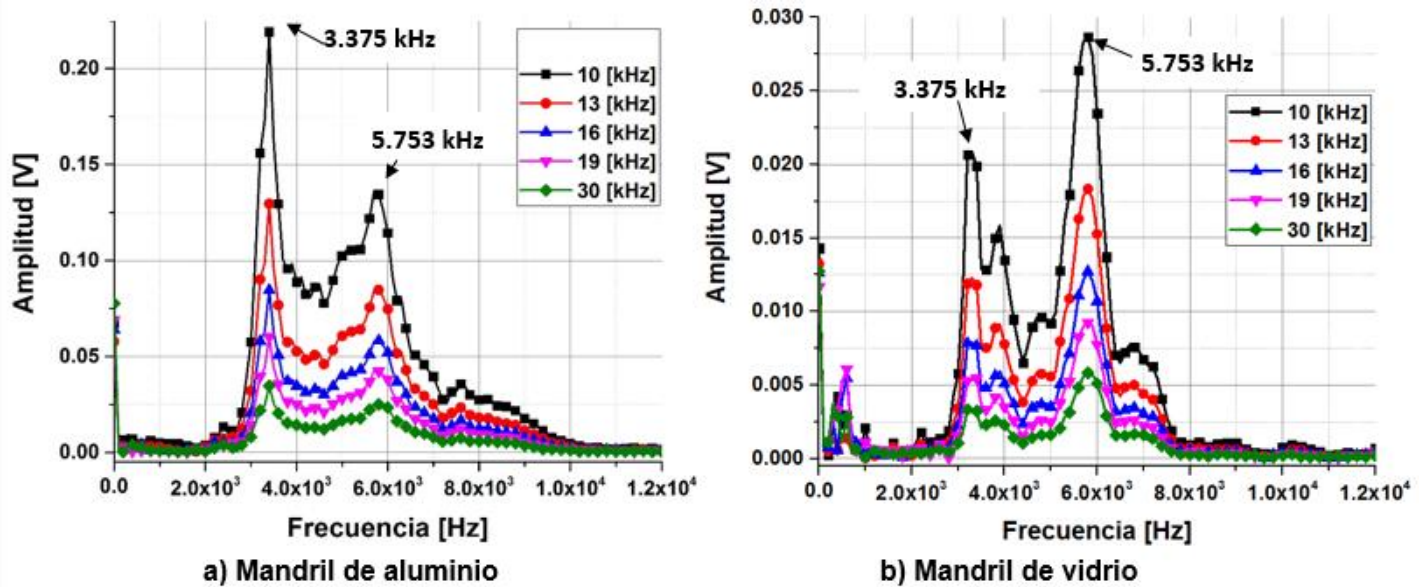


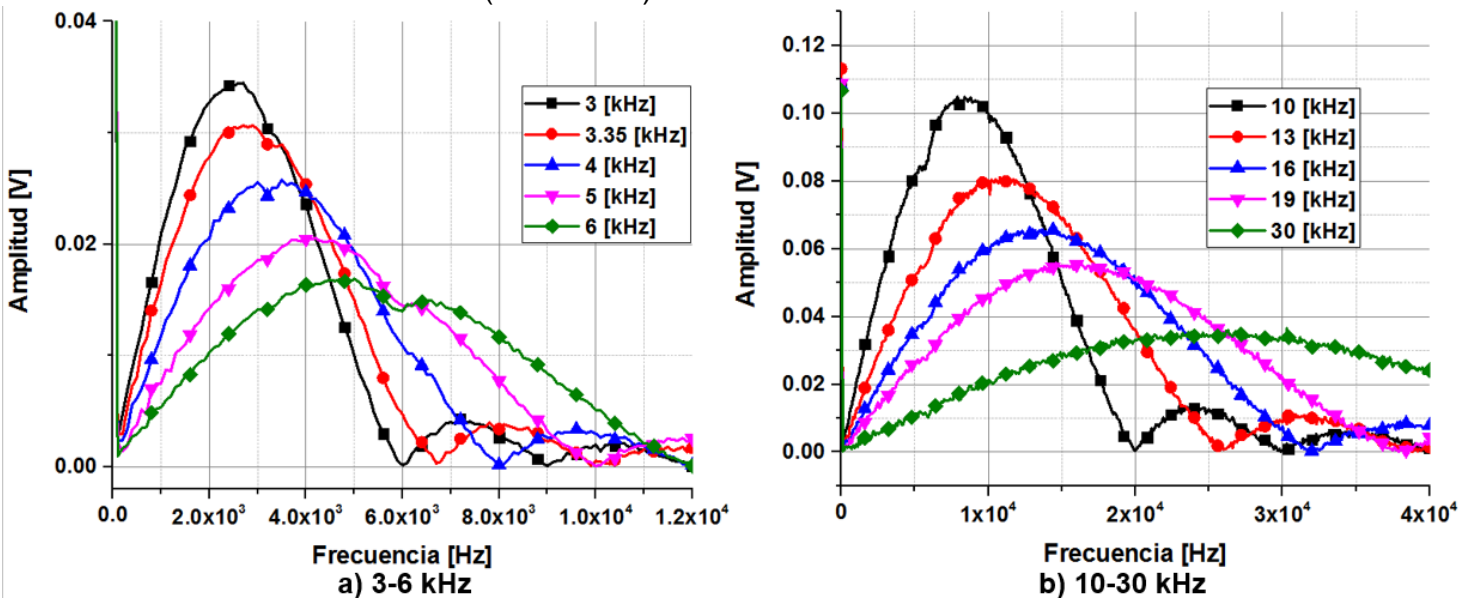
Figura 3.3. Análisis espectral de las señales detectadas por el hidrófono para un rango de frecuencias de 3-6 kHz, a) Mandril de aluminio b) Mandril de vidrio.

Para el barrido de frecuencias de 10-30 kHz, ocurre algo similar al primer barrido de frecuencias, las dos componentes en frecuencias detectadas son 3.375 kHz y 5.753 kHz (ver figura 3.4).



**Figura 3.4.** Análisis espectral de las señales detectadas por el hidrófono para un rango de frecuencias de 10-30 kHz. a) Mandril de aluminio b) Mandril de vidrio.

El comportamiento anterior, puede ser explicado al observar los espectros correspondientes a la señal de referencia, es decir, las señales de salida del generador de funciones que se muestran en la figura 3.5. Debido a que el ancho espectral de todas las señales de salida, comprende la frecuencia de resonancia del sistema, ocasionando que la componente de mayor amplitud sea vea a la frecuencia mencionada (3.375 KHz).



**Figura 3.5.** Espectros de la señales de salida del generador de funciones, a) 3-6 kHz, b) 10-30 kHz.

### 3.2. Atenuación de la señal

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 [31].

- 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 [3]:

$$A(x) = A(0)\exp(-\mu x), \quad (3.1)$$

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

$$\mu = \frac{1}{x} \ln\left(\frac{A(0)}{A(x)}\right), \quad (3.2)$$

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:

$$\alpha = 20(\log_{10} e)\mu = 8.686 \mu, \quad (3.3)$$

#### 3.2.1. Atenuación de las señales con una excitación de onda continua

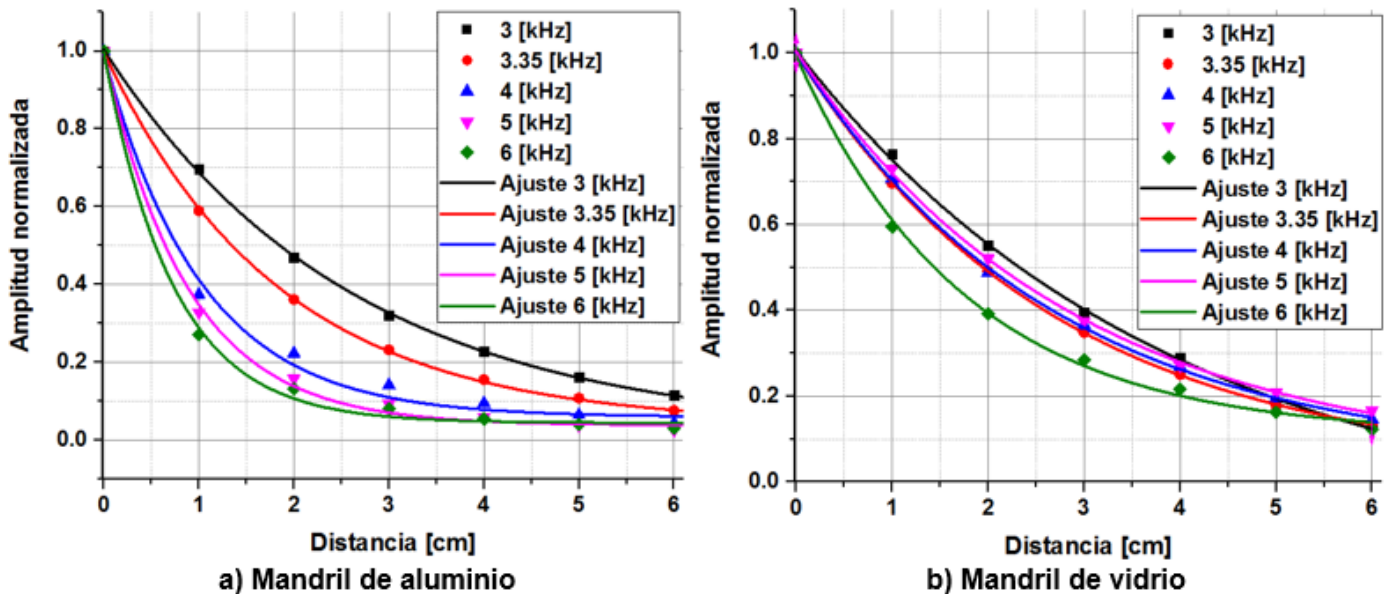


Figura 3.6. Atenuación de la señal acústica medida con el hidrófono. a) Mandril de aluminio, b) Mandril de vidrio.

Se observa que la atenuación aumenta a medida que se incrementa la frecuencia. Para el mandril de aluminio, las frecuencias de menor atenuación son 3 kHz y 3.35 kHz, con una atenuación aproximada de -317.19 dB/m y -406.20 dB/m respectivamente, de tal forma que para una distancia de 2 cm de separación entre la fuente y el sensor se pierde cerca de la mitad de la amplitud de la señal. Para el resto de las señales se observa que son atenuadas más rápido y pierden más de la mitad de la intensidad de la señal detectada al alejar la fuente 1 cm. Para el mandril de vidrio, la atenuación es menor a la calculada con el mandril de aluminio, ya que para este caso a una distancia de 3 cm es cuando se pierde más de la mitad de la intensidad de la señal detectada, es decir, la atenuación aproximada para 3 kHz y 3.35 kHz es de -269.69 dB/m y -303.32 dB/m respectivamente. En la tabla 3.1, se anexan los valores de las amplitudes de las señales detectadas por ambos mandriles a diferentes distancias de separación de la fuente.

Frecuencia kHz	Mandril de aluminio					Mandril de vidrio				
	3	3.35	4	5	6	3	3.35	4	5	6
Distancia cm	Amplitud [V <sub>pp</sub> ]									
0	3.51	11.36	4.30	4.17	3.46	0.37	1.25	0.65	0.79	0.80
1	2.45	6.70	1.61	1.37	0.94	0.38	1.12	0.41	0.48	0.74
2	1.65	4.11	0.96	0.66	0.46	0.29	0.78	0.29	0.35	0.44
3	1.13	2.64	0.61	0.39	0.28	0.21	0.55	0.20	0.25	0.29
4	0.80	1.77	0.41	0.25	0.19	0.15	0.39	0.15	0.18	0.21
5	0.57	1.23	0.28	0.16	0.14	0.11	0.28	0.11	0.13	0.16
6	0.41	0.87	0.19	0.11	0.11	0.07	0.20	0.08	0.10	0.12
7	0.29	0.63	0.14	0.08	0.09	0.05	0.15	0.06	0.08	0.09

Tabla 3.1. Atenuación de la señal continua.

### 3.2.2. Atenuación de las señales con una excitación pulsada

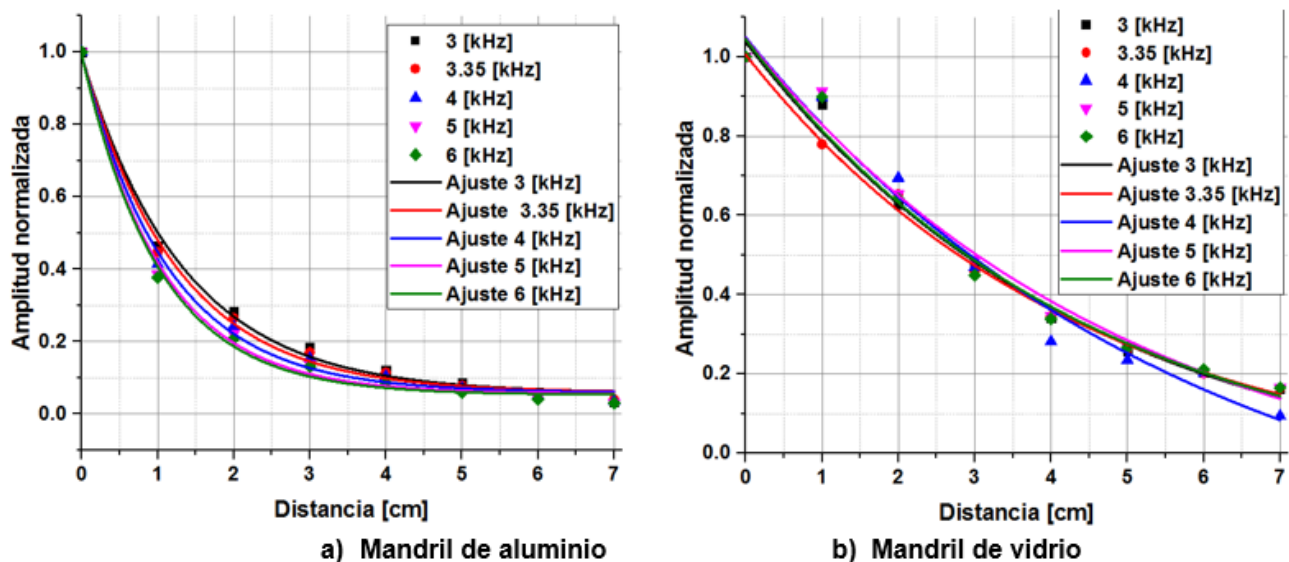


Figura 3.7. Atenuación de la señal pulsada al alejar la fuente del sensor, a) Mandril de aluminio, b) Mandril de vidrio.

Con señal pulsada, la atenuación de la señal en el mandril de aluminio, es más grande con respecto al de onda continua. La señal detectada decae más de la mitad desde el primer centímetro de desplazamiento de la fuente, con una atenuación aproximada de -487.58 dB/m a -576.92 dB/m en el rango de frecuencias de 3-6 kHz (ver figura 3.7).

En el mandril de vidrio se obtiene un atenuación promedio de -230.18 dB/m para la mayor parte del rango de frecuencias, siendo la más pequeña de todos los casos analizados. Sin embargo, para este caso no se observa que la atenuación incremente en función de la frecuencia. En la tabla 3.2, se muestran los valores de las amplitudes de las señales detectadas por ambos mandriles a diferentes distancias de separación de la fuente.

Frecuencia kHz	Mandril de aluminio					Mandril de vidrio				
	3	3.35	4	5	6	3	3.35	4	5	6
Distancia cm	Amplitud V <sub>pp</sub>									
0	13.55	13.03	11.52	9.63	8.02	1.67	1.59	1.49	1.27	1.09
1	6.31	5.83	4.77	3.71	3.03	1.47	1.24	1.34	1.16	0.98
2	3.83	3.45	2.79	2.13	1.67	1.05	1.04	1.03	0.83	0.70
3	2.50	2.22	1.77	1.33	1.05	0.78	0.73	0.70	0.62	0.49
4	1.65	1.49	1.20	0.89	0.69	0.57	0.55	0.42	0.44	0.37
5	1.16	1.02	0.82	0.61	0.47	0.43	0.42	0.35	0.34	0.29
6	0.83	0.74	0.60	0.43	0.33	0.34	0.32	0.30	0.26	0.23
7	0.45	0.52	0.41	0.30	0.24	0.27	0.26	0.14	0.21	0.18

**Tabla 3.2.** Atenuación de la señal pulsada.

### 3.3. Desfase de la señal

Desde un punto de vista general, se puede considerar que una señal de salida  $y(t)$  retardada en el tiempo y reteniendo su forma de onda con referencia a una entrada  $g(t)$  (sufriendo solamente un retardo puro), debe cumplir con la siguiente condición:

$$y(t) = kg(t - t_d) = kg(t) * \delta(t - t_d) \quad (3.4)$$

Donde  $\delta$  es la función de Dirac,  $*$  es la convolución en el tiempo y  $t_d$  es el retardo en el tiempo, que depende entre otros parámetros, de la velocidad de propagación del sonido en el medio y de la distancia recorrida por la señal.

La ecuación 3.4, asume que todas las componentes en frecuencia de la señal son amplificadas o atenuadas por el mismo factor, lo que implica que  $|H(\omega)|$  es constante y que la señal no está distorsionada. Por lo tanto  $|H(\omega)| = k$ . Además, todas las componentes en frecuencia de la señal de salida, deberá tener el mismo retardo de tiempo  $t_d$ .

Este retardo corresponde en el dominio de la frecuencia a la modificación descrita por la propiedad de cambio de tiempo de la transformada de Fourier:

$$f(t - \tau) \leftrightarrow F(\omega)e^{-j\omega\tau} \quad (3.5)$$

Para una señal de entrada que tiene una forma de onda armónica descrita por una función  $\cos\theta(t)$ , donde  $\theta(t) = \omega t$  es el ángulo, este retardo de la señal a la salida puede ser expresado como:

$$\cos\omega(t - t_d) = \cos(\omega t - \omega t_d) \quad (3.6)$$

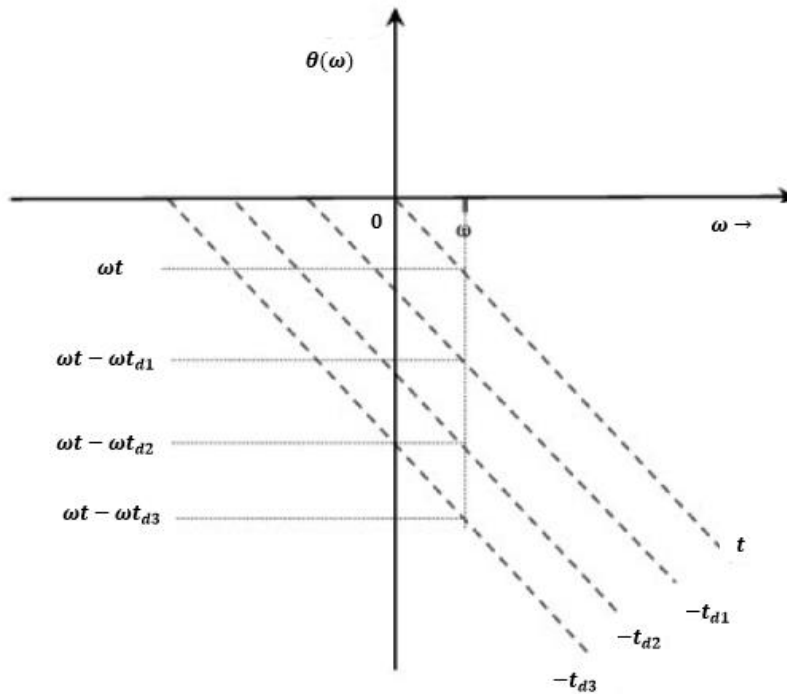
Consecuentemente, un retardo  $t_d$  en una señal de banda ancha, que afecta a toda la señal, corresponde a un desfase de  $-\omega t_d$  en cada componente de frecuencia  $\omega$ . Por lo tanto, para un sistema que produce un retardo de tiempo dado a partir de un impulso de entrada, los diferentes retardos de fase para todas sus componentes espectrales son proporcionales a la frecuencia particular  $\omega$ .

Un desplazamiento de fase de  $n\pi$  (donde  $n$  es un entero) en una señal coseno, cuando  $n$  es par, implica la misma señal coseno. Para una señal de banda ancha, la suma de todas sus componentes da como resultado una señal sin distorsión. Cuando  $n$  es impar, un desplazamiento de fase de  $n\pi$  en una señal coseno implica un cambio de signo y la suma de todas sus componentes también resulta en una señal sin distorsión. Por lo tanto, una condición más general para las señales pulsadas sin distorsión pasando por un medio es que sólo los cambios de fase se originan durante la transferencia de señal a través del medio y está dada por:

$$\theta(\omega) = \pm n\pi\omega - \omega t_d \quad (3.7)$$

Para el caso particular con señales propagándose en un medio lineal, la expresión se reduce:

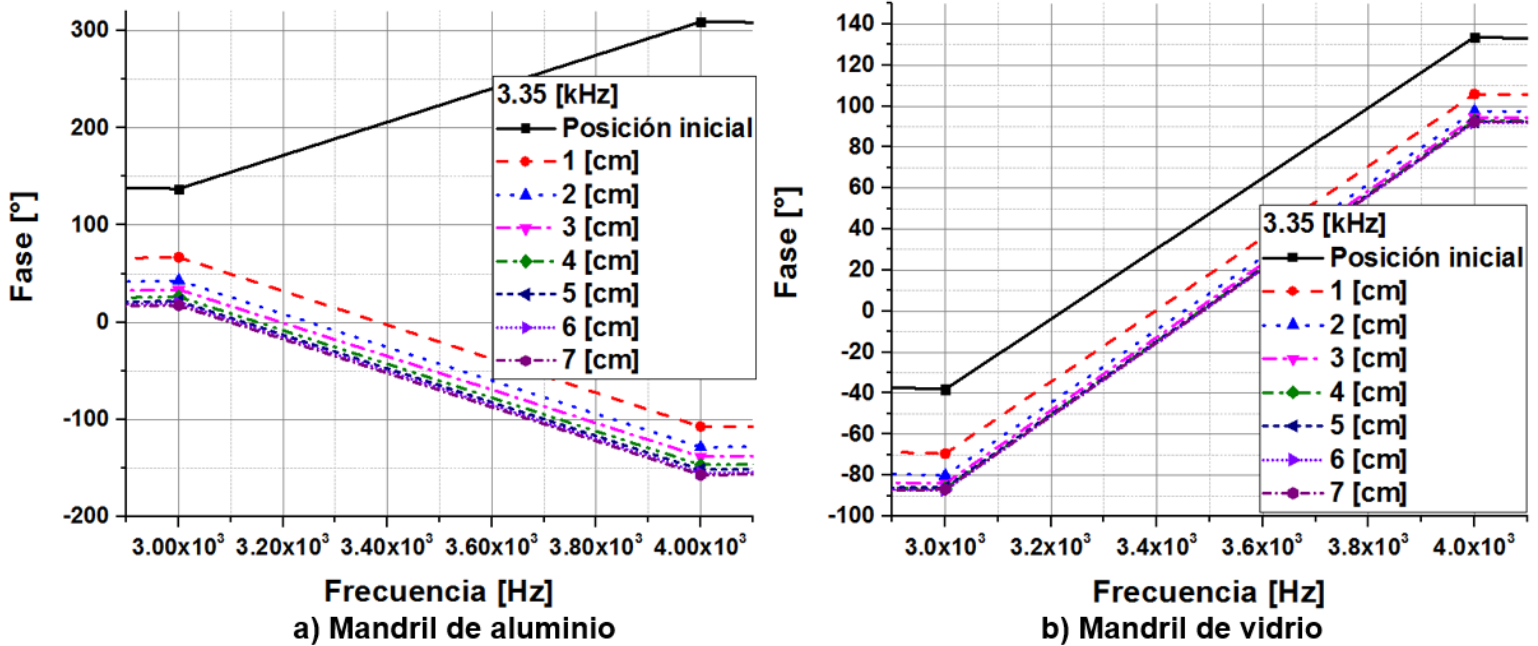
$$\theta(\omega) = -\omega t_d \quad (3.8)$$



**Figura 3.8.** Fase de un sistema sin distorsión [31].

En la figura 3.8, se puede observar que cuando la señal no es distorsionada por el medio,  $\theta(\omega)$  es una línea recta con pendiente igual a  $-t_d$ . Cuando la señal sufre un retraso, la línea se desplaza, manteniendo la misma pendiente. La pendiente de línea recta puede ser positiva o negativa dependiendo del desplazamiento con respecto a la señal de referencia [31].

### 3.3.1. Desfase de la señal de salida del hidrófono para una señal de excitación continua



**Figura 3.9.** Desfase de la señal continua a una frecuencia de 3.35 kHz, como resultado de alejar la fuente del mandril a) Mandril de aluminio, b) Mandril de vidrio.

En la figura 3.9 se muestran las fases de cada una de las señales (onda continua) calculadas mediante la transformada rápida de Fourier. Descartando la fase correspondiente a la posición inicial del mandril de aluminio, se puede observar que la pendiente es la misma y es desplazada hacia abajo en ambos mandriles. Sin embargo, esto solo ocurre para la frecuencia de resonancia (3.35 kHz), ya que para el resto de las frecuencias se presentan cambios de pendiente (ver figura 3.10). Por lo tanto, el análisis de la fase solo se realiza para la frecuencia de 3.35 kHz, como se indica en la tabla 3.3. Se calcula  $t_d$  de cada una de las fases mediante la ecuación 3.8 y en las columnas “retardo” se indica la diferencia con respecto a la posición inicial (excepto para el mandril de aluminio ya que el primer dato tiene una pendiente contraria al resto de las demás frecuencias), donde el signo negativo, se debe a que la fuente es alejada del mandril. Además, el tiempo de retardo calculado es diferente para cada mandril a pesar de que la fuente acústica es desplazada la misma distancia y es excitada con la misma frecuencia.

Mandril	Aluminio		Vidrio	
Desplazamiento cm	Fase °	Retardo $\mu$ s	Fase °	Retardo $\mu$ s
Posición inicial (0)	197.53	----	21.97	0
1	5.92	0	-8.11	-24.94
2	-17.06	-19.05	-17.95	-33.10
3	-26.53	-26.91	-21.56	-36.10
4	-34.40	-33.43	-23.55	-37.75
5	-38.94	-37.19	-23.49	-37.69
6	-41.62	-39.42	-24.54	-38.56
7	-43.76	-41.19	-24.19	-38.27

Tabla 3.3. Desfase de la señal continua como resultado de alejar la fuente del mandril.

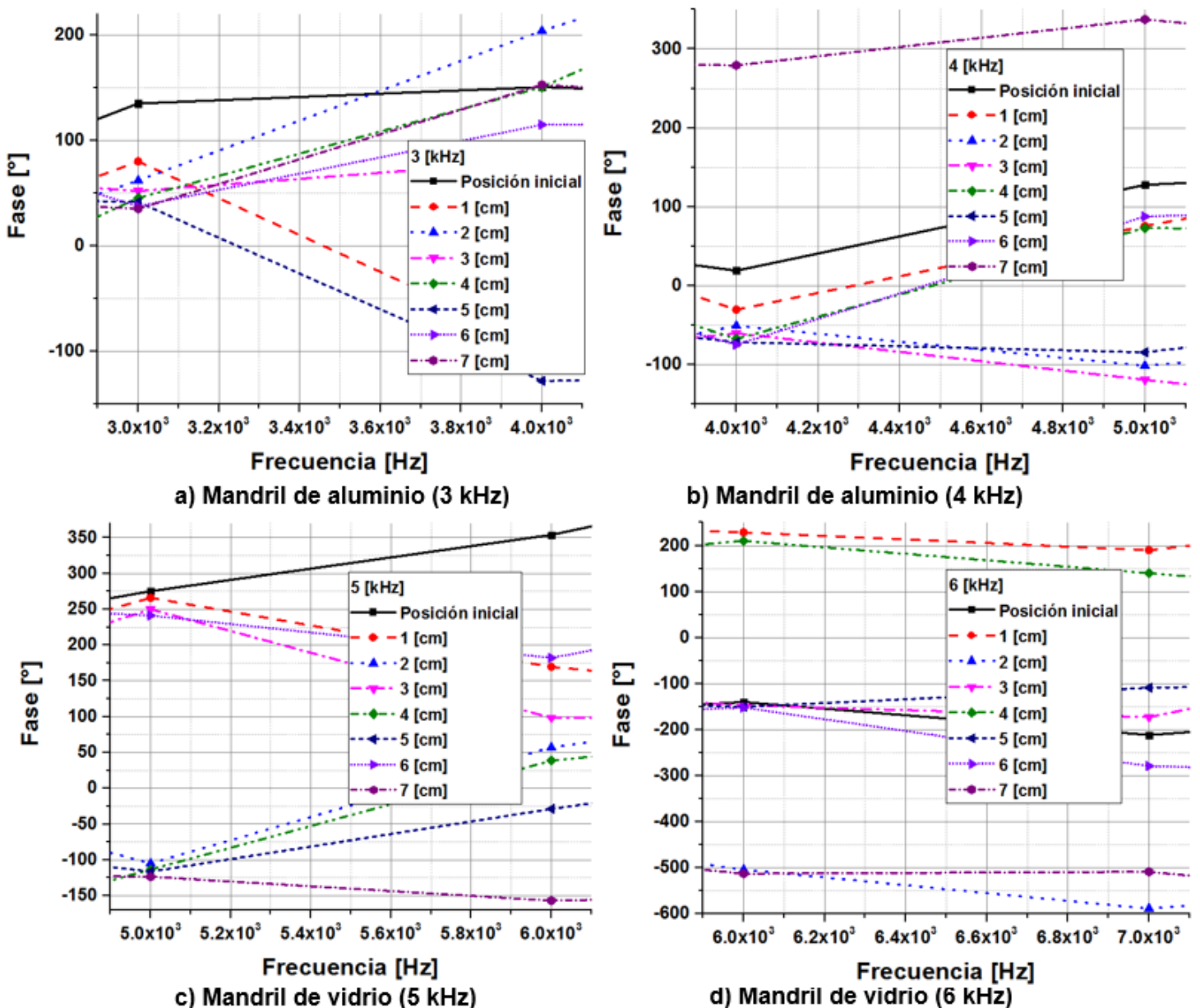


Figura 3.10. Desfase de la señal continua a diferente frecuencia, como resultado de alinear la fuente del mandril, a) 3 kHz (aluminio) b) 4 kHz (aluminio), c) 5 kHz (vidrio) y d) 6 kHz (vidrio).



Debido a que las pendientes de fase dificultan el cálculo del retardo en tiempo, en la tabla 3.4, se muestran los retardos de las señales con respecto a la posición inicial de la señal a partir de la diferencia de tiempo de los picos y valles de las señales obtenidas con el osciloscopio. Se observa que el retardo es diferente para cada frecuencia y que no tiene una relación lineal con el desplazamiento de la fuente, de tal forma que con el tiempo obtenido no es posible calcular la distancia de separación entre la fuente y el sensor.

Mandril	Aluminio					Vidrio				
Frecuencia kHz	3	3.35	4	5	6	3	3.35	4	5	6
Distancia cm	-Retardo $\mu$ s									
1	51.05	53.55	34.53	34.28	12.26	23.52	25.27	23.02	5.05	-4.00
2	67.56	72.82	48.54	41.79	19.77	29.03	32.78	27.53	11.01	2.00
3	76.82	80.57	55.05	44.79	22.02	31.53	36.28	30.03	14.01	3.50
4	83.33	97.58	60.05	45.79	22.77	33.28	37.28	30.53	16.01	4.50
5	86.58	91.33	62.56	46.54	22.77	35.29	37.53	31.03	17.27	4.75
6	90.83	93.58	65.06	46.79	23.02	33.78	38.03	32.53	18.77	5.76
7	92.33	95.34	69.56	47.79	20.02	31.28	37.78	32.03	21.02	6.01

**Tabla 3.4.** Retardo de la señal continua para todo el rango de frecuencias.

### 3.3.2. Desfase de la señal de salida del hidrófono para una señal de excitación pulsada

Como se mencionó previamente, la componente en frecuencia detectada para la señal pulsada está situada en 3.35 kHz. Por esta razón es que las pendientes de fase son del mismo valor para una frecuencia en particular. Sin embargo, al igual que el caso de onda continua, las pendientes no se desplazan uniformemente en relación a los desplazamientos de la fuente y en algunos casos se superponen sobre otra pendiente. En la figura 3.11 se muestra un ejemplo con la frecuencia de resonancia para ambos mandriles.

También se calcula el retardo de la señal para este caso, aunque no se encontró una relación con respecto al desplazamiento de la fuente, tal como se muestra en la tabla 3.5. Por otro lado, al ser muy parecidas las gráficas de las demás frecuencias se omitió su presentación.

Mandril	Aluminio		Vidrio	
Desplazamiento [cm]	Fase [°]	Retardo [ $\mu$ s]	Fase [°]	Retardo [ $\mu$ s]
Posición inicial (0)	-5426.33	0	-2284.75	0
1	-3691.15	-53.75	-2668.92	-20.04
2	-2991.98	-71.02	-3013.48	-7.23
3	-3003.15	-80.29	-2659.40	-12.15
4	-3368.12	-84.40	-1216.26	-9.54
5	-2650.91	-86.72	-2658.76	-11.62
6	-2295.91	-90.86	-854.76	-8.30
7	-2298.03	-92.62	-856.49	-9.73

**Tabla 3.5.** Retardo de la señal pulsada con frecuencia de resonancia.

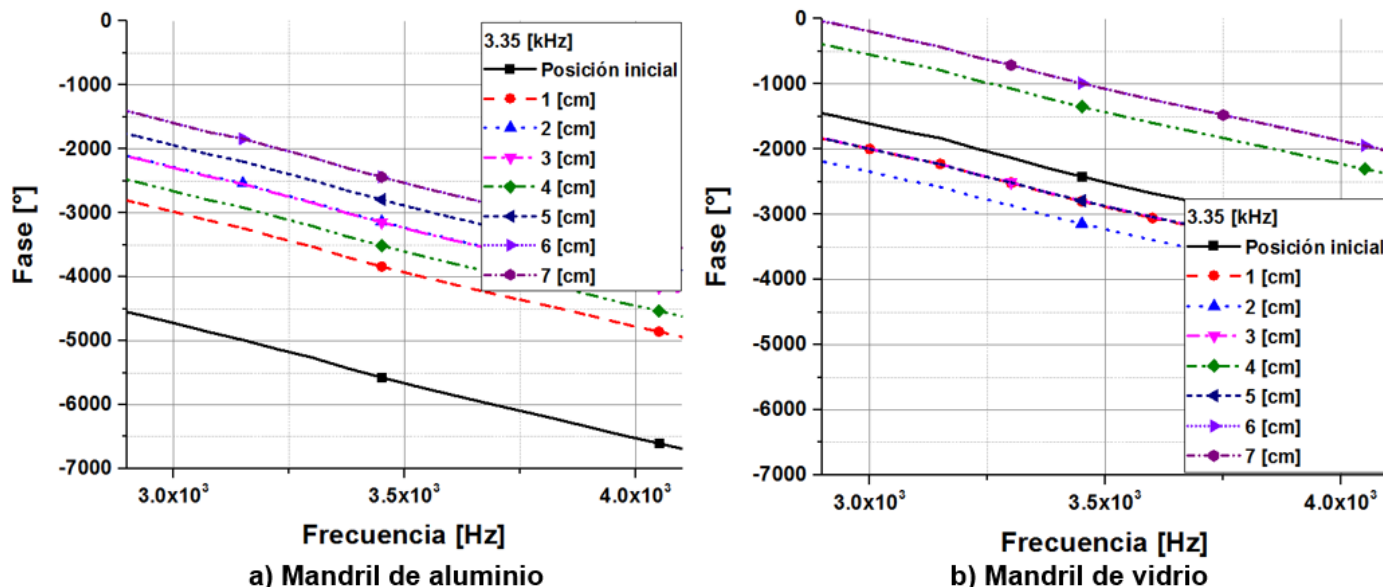


Figura 3.11. Desfase de la señal pulsada a una frecuencia de 3.35 kHz, como resultado de alejar la fuente del mandril a) Mandril de aluminio, b) Mandril de vidrio.

### 3.4. Relación entre la tensión aplicada a la fuente y la tensión detectada por el sensor

#### 3.4.1. Señal de excitación de onda continua

En la figura 3.12, se muestra las gráficas de la relación que hay entre la tensión alimentación del buzzer y la amplitud de la señal de salida del hidrófono que es detectada por cada uno de los mandriles. Esto para una señal continua con frecuencia de 3.35 kHz (resonancia) y donde el sensor esta junto a la fuente.

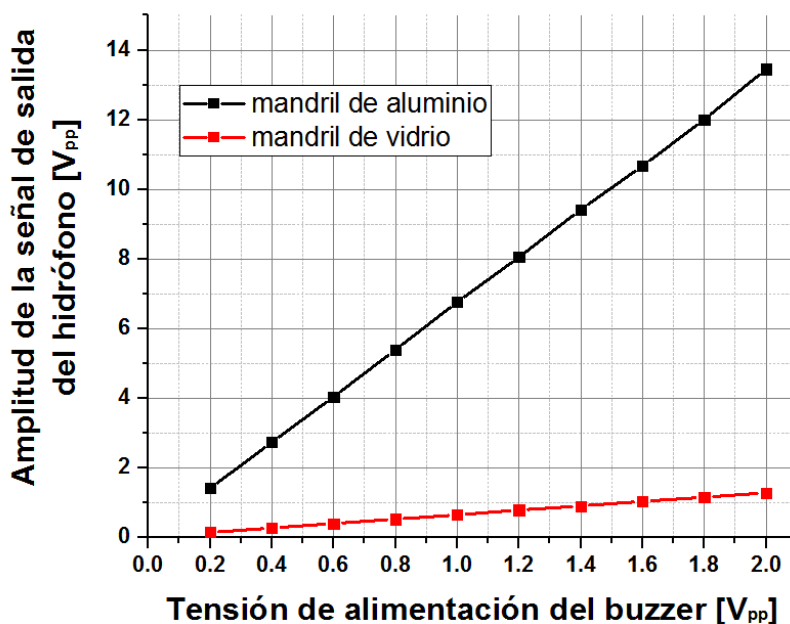


Figura 3.12. Amplitud de la señal de salida del hidrófono para ambos mandriles en función de la tensión de alimentación del buzzer para señal continua.

El comportamiento es lineal en ambos casos, de tal forma que el mandril de aluminio incrementa a una razón de aproximadamente  $6.76 V_{pp}$  por cada  $1 V_{pp}$  aplicado al buzzer, mientras que el mandril de vidrio lo hace a razón de  $0.66 V_{pp}$  por cada  $1 V_{pp}$ , recordando que la señal detectada tiene una ganancia de 1000. En la Tabla 3.6 se muestran los valores obtenidos por el sensor después de realizar el barrido de tensión aplicada al buzzer, observando que las mediciones del mandril de aluminio son aproximadamente 10 veces más grande que las obtenidas en el mandril de vidrio.

Amplitud aplicada a la fuente [ $V_{pp}$ ]	Amplitud detectada mandril de aluminio [ $V_{pp}$ ]	Amplitud detectada mandril de vidrio [ $V_{pp}$ ]
0.2	1.41	0.14
0.4	2.73	0.27
0.6	4.04	0.40
0.8	5.39	0.52
1	6.76	0.64
1.2	8.05	0.78
1.4	9.42	0.90
1.6	10.67	1.04
1.8	12.00	1.15
2	13.45	1.28

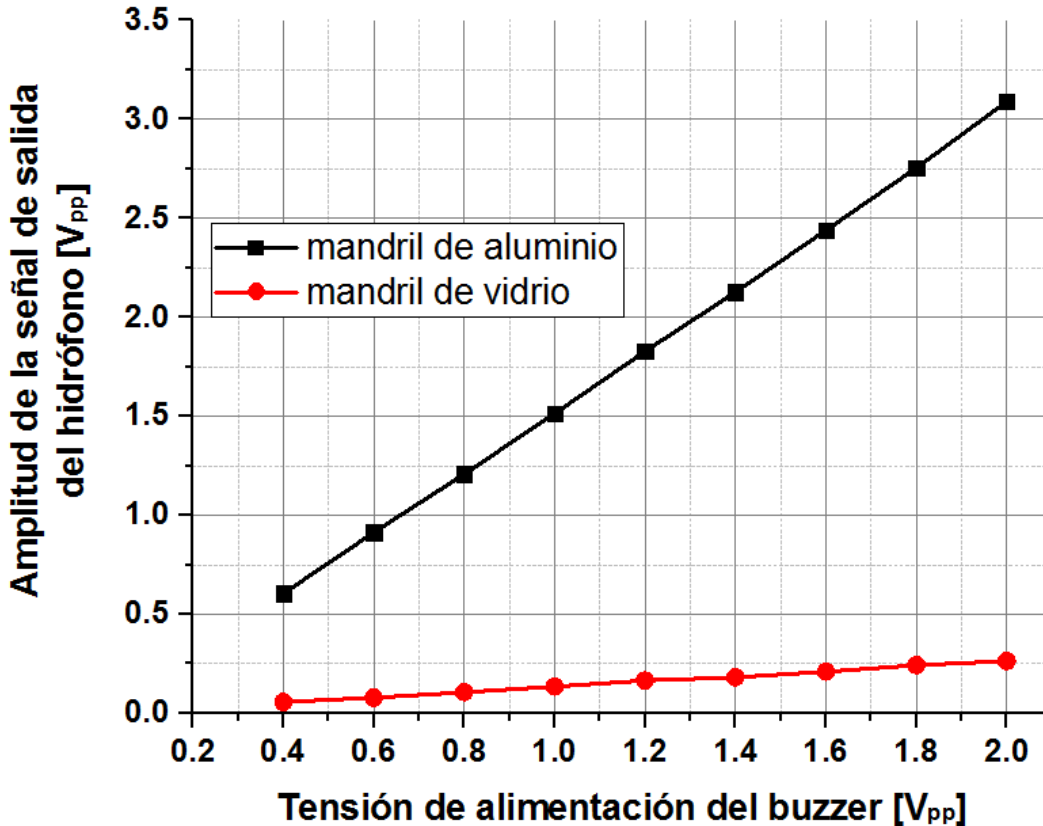
**Tabla 3.6.** Relación de voltajes detectados por los dos mandriles aplicando una señal continua.

### 3.4.2. Señal de excitación de onda pulsada

Al aplicar una señal pulsada a una frecuencia de 3.35 kHz, en el mandril de aluminio se detecta aproximadamente  $1.54 V_{pp}$  por cada  $1 V_{pp}$  aplicado al buzzer. En cuanto al mandril de vidrio la relación es de  $0.13 V_{pp}$  por cada  $1 V_{pp}$  aplicado a la fuente (ver figura 3.13). Como se puede apreciar en ambos mandriles, al utilizar una señal pulsada, las amplitudes de las señales detectadas son menores a las obtenidas con señal continua, aproximadamente la señal decae 4.5 veces. Sin embargo, la diferencia entre las amplitudes de las señales medidas con el mandril de aluminio y el mandril de vidrio es de aproximadamente 10 veces más grande como en onda continua. En la tabla 3.7 se muestran las amplitudes medidas con señal pulsada.

Amplitud aplicada a la fuente [ $V_{pp}$ ]	Amplitud detectada mandril de aluminio [ $V_{pp}$ ]	Amplitud detectada mandril de vidrio [ $V_{pp}$ ]
0.4	0.61	0.06
0.6	0.91	0.08
0.8	1.21	0.11
1	1.51	0.14
1.2	1.83	0.16
1.4	2.13	0.18
1.6	2.44	0.21
1.8	2.75	0.24
2	3.09	0.26

**Tabla 3.7.** Relación de voltajes detectados por los dos mandriles aplicando una señal pulsada.



*Figura 3.13. Amplitud de la señal de salida del hidrófono para ambos mandriles en función de la tensión de alimentación del buzzer para señal pulsada.*

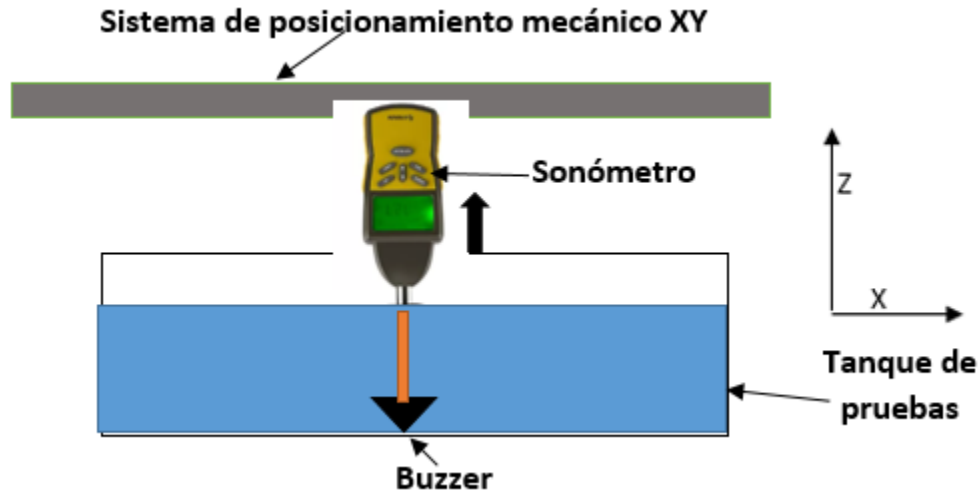
### 3.5. Presión acústica producida por el buzzer

Para tener una aproximación de la presión acústica ejercida en el mandril por la fuente acústica, se sumergió la punta de un sonómetro modelo HER-403, con hoja de especificación en [32], en el tanque de pruebas. Para este fin fue necesario aislar la punta con un globo e introducir verticalmente el sensor para que no se mojara, de tal forma que el buzzer permanece fijo en el fondo del tanque mientras el sensor se acerca a su centro geométrico mediante el eje Z del sistema de posicionamiento mecánico, en la figura 3.14 se muestra un esquema de la manera como se montó el sonómetro para medir la presión acústica.

La primera prueba consistió en realizar el barrido en frecuencia de 3-9 kHz con una señal sinusoidal de 2 V<sub>pp</sub> y un segundo barrido de 10-20 kHz (debido a que el rango de operación del HER-403 es para frecuencias audibles) con una señal sinusoidal de 20 V<sub>pp</sub>, registrando los valores en dB medidos con sonómetro y su equivalente a pascales en la tabla 3.9.

Además, se realizó el barrido en amplitud de la tensión de alimentación del buzzer en un rango de 0.2 V<sub>pp</sub> a 2 V<sub>pp</sub> con incrementos de 0.2 V<sub>pp</sub> para la frecuencia de resonancia (3.35 kHz) mostrando los valores obtenidos en la tabla 3.10.

Finalmente para las frecuencias de 3,3.35, 4, 5 y 6 kHz se mide la presión sonora alejando el sonómetro de la fuente acústica desde la posición inicial ( $\approx 0$ ) hasta 3.5 cm (distancia máxima a la cual se puede desplazar el motor debido a las dimensiones del sensor) a incrementos de 0.5 cm en dirección del eje Z.



**Figura 3.14.** Esquema del montaje del sensor HER-403 para medir la presión acústica producida por el buzzer.

El sonómetro está compuesto por un micrófono, amplificadores, redes de ponderación y una pantalla que indica en decibelios. El micrófono actúa para convertir la señal acústica de entrada (presión acústica) en una señal eléctrica (usualmente voltaje). Esta señal es amplificada y entonces la señal puede ser modificada por alguna red de ponderación (A,B,C). Finalmente la señal es digitalizada para accionar el medidor de visualización, donde la salida es indicada en dB [33].

La expresión para calcular el nivel de presión del sonido (*SPL*) está dada por:

$$SPL = 20 \log \left( \frac{p}{p_0} \right) \quad (3.9)$$

Donde *SPL* es expresada en dB y  $p_0$  es la presión de referencia. En aire, la presión de referencia es  $20 \mu Pa$ , mientras que en agua la presión de referencia es  $1 \mu Pa$  [34].

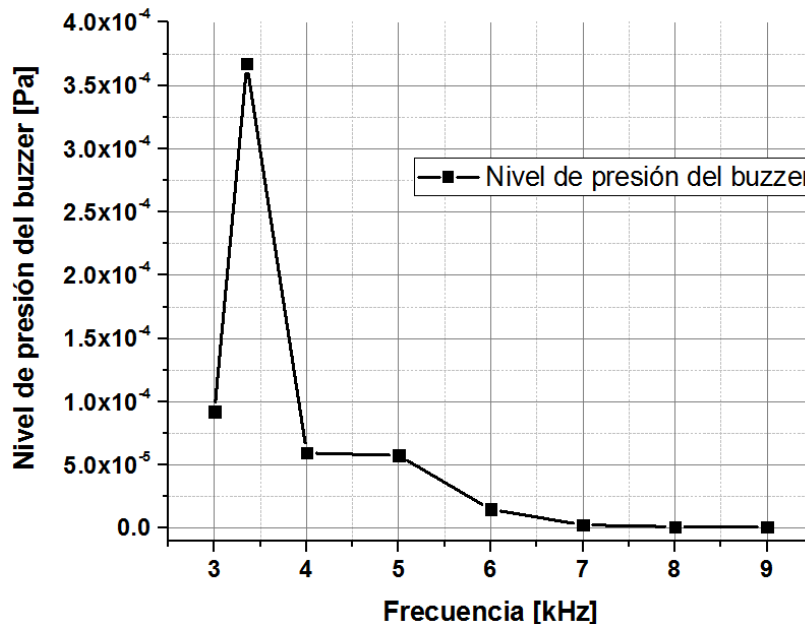
Como se mencionó en el capítulo dos, se utilizó un sonómetro para calcular la presión acústica producida por el buzzer. Sin embargo, se debe tener en cuenta que este dispositivo está diseñado para medir el nivel de presión sonora en aire y que las dimensiones del área activa del sensor son más pequeñas en relación con el área de fibra óptica que esta enrollada en la lata.

Por lo tanto, despejando  $p$  de la expresión 3.9, se obtuvieron las presiones acústicas del buzzer. En la tabla 3.8, se muestran las presiones calculadas cuando el buzzer y el mandril están en su posición inicial (0 cm) para un barrido de frecuencias de 3 kHz hasta 20 kHz.

Frecuencia [kHz]	Tensión de alimentación [V <sub>pp</sub> ]	Nivel de presión medida (SPL) [dB]	Presión acústica calculada [μPa]
3	2	39.3	92.26
3.35	2	51.3	367.28
4	2	35.5	59.57
5	2	35.2	57.54
6	2	23.5	14.96
7	2	8.3	2.60
8	2	1.6	1.20
9	2	0.4	1.05
10	20	26.5	21.13
11	20	22.1	12.74
12	20	17.2	7.24
13	20	6.5	2.11
14	20	3.1	1.43
15	20	4.5	1.68
16	20	1.2	1.15
17	20	0.5	1.06
18	20	0.1	1.01
19	20	0.1	1.01
20	20	0.1	1.01

**Tabla 3. 8.** Presión acústica de la fuente al variar la frecuencia.

El nivel de presión de sonido más alto es de aproximadamente 367.28 μPa, correspondiente a una frecuencia de 3.35 kHz y una tensión de alimentación de 2 V<sub>pp</sub>. En la figura 3.15 se muestra la diferencia de presión para esta frecuencia en relación con el resto de las frecuencias. Por otro lado, en la tabla 3.9 se muestran las mediciones registradas con el sonómetro como resultado de variar la tensión de alimentación del buzzer, observando que incrementa linealmente el nivel de presión acústica a partir de 1.4 V<sub>pp</sub>.



**Figura 3. 15.** Nivel de presión del sonido para el rango de frecuencia de 3-9 kHz.

Tensión de Alimentación $V_{pp}$	Nivel de presión medida (SPL) dB	Nivel de presión calculada $\mu\text{Pa}$
0.2	33.8	48.98
0.4	38.4	83.18
0.6	39.0	89.13
0.8	39.2	91.20
1.0	39.6	95.50
1.2	39.8	97.72
1.4	47.9	248.31
1.6	49.1	285.10
1.8	50.2	323.59
2.0	51.3	367.28

Tabla 3.9. Presión acústica de la fuente al variar la tensión de alimentación de la fuente.

Finalmente en la figura 3.16, se muestra la relación de presiones medidas con el sonómetro como resultado de alejar la fuente, en un rango de frecuencias de 3-6 kHz. Donde la atenuación es muy grande a la frecuencia de resonancia, al disminuir más de la mitad de la presión a una distancia de 0.5 cm (ver tabla 3.10).

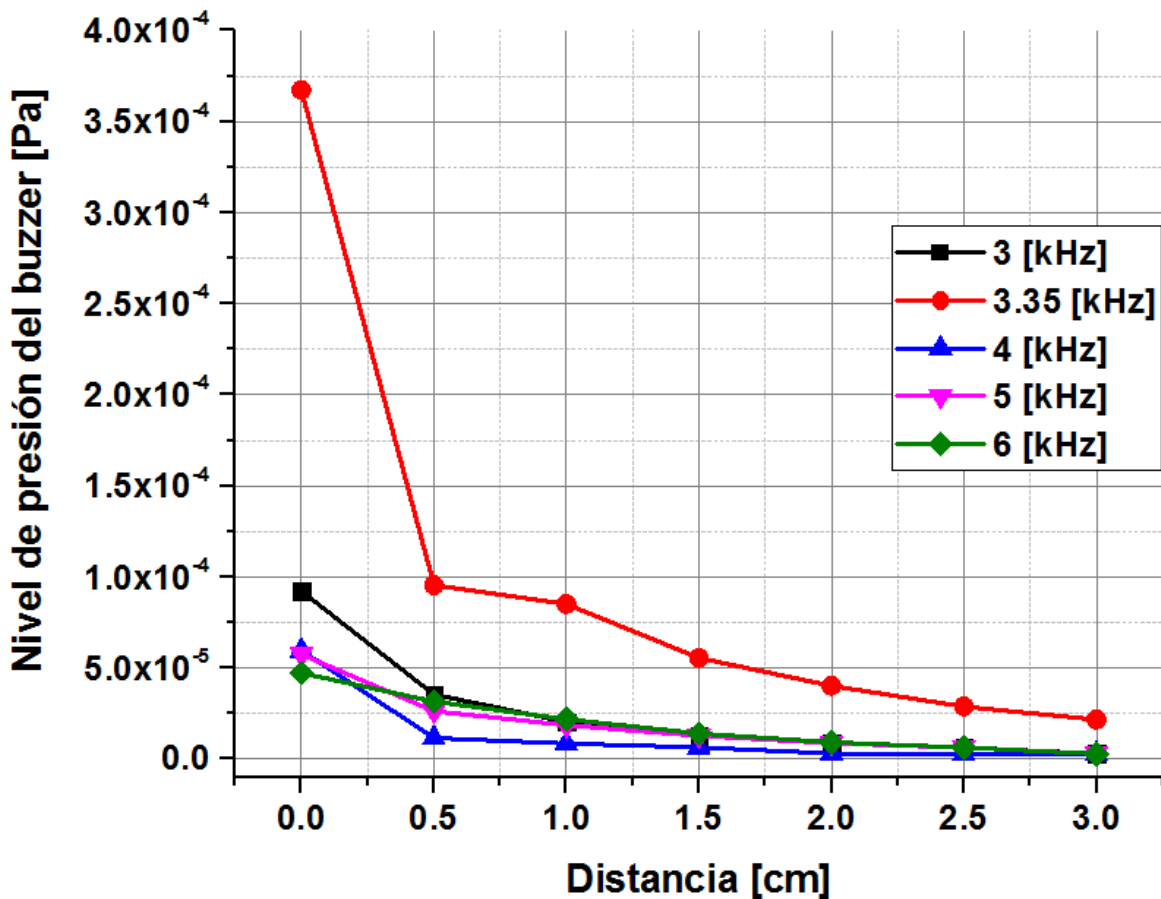


Figura 3. 16. Nivel de presión de sonido en función de la distancia de separación entre el buzzer y el sonómetro.

<b>Distancia cm</b>	<b>Nivel de presión medida (SPL) dB</b>	<b>Nivel de presión calculada <math>\mu</math>Pa</b>
<b>0</b>	51.3	367.28
<b>0.5</b>	39.6	95.50
<b>1.0</b>	38.6	85.11
<b>1.5</b>	34.9	55.59
<b>2.0</b>	32.1	40.27
<b>2.5</b>	29.2	28.84
<b>3.0</b>	26.7	21.63

**Tabla 3.10.** Atenuación del nivel de presión sonora en función de la distancia entre el buzzer y el sonómetro.



## Capítulo IV. Conclusiones

### 4.1. Conclusiones generales

Del trabajo realizado se pudo verificar que el principio de operación de un interferómetro de Sagnac puede ser aplicado a un hidrófono de fibra óptica para la detección de campos acústicos de algunas decenas de kHz, resultado una propuesta que es fácil de implementar a diferencia de otras configuraciones consultadas. En términos generales se puede decir que este hidrófono es capaz de detectar las formas de onda, amplitudes y frecuencias de las señales sinusoidales continuas para un amplio rango de frecuencias (3-30kHz). Sin embargo, con onda pulsada se limita a la detección de la frecuencia de resonancia del buzzer. Por otro lado, se observó que el mandril de aluminio detecta señales de mayor amplitud en comparación con el mandril de vidrio, es decir, el de aluminio resulta ser más sensible a las vibraciones producidas por la fuente acústica. A continuación se hace una revisión más específica de los datos obtenidos para ambos mandriles al ser evaluados tanto en onda continua como en onda pulsada.

Se observó que los mandriles propuestos son capaces de detectar las formas de onda de las señales continuas con las que es excitado el buzzer, desde 3 kHz hasta 30 kHz (frecuencia en el rango de ultrasonido). Cabe aclarar que para detectar frecuencias superiores a 10 kHz, la amplitud de la onda acústica incidente debe ser muy grande (20 V<sub>pp</sub>) y la separación entre el mandril y la fuente debe ser lo más cercano posible. Por otro lado, para las frecuencias inferiores a 3 kHz, las señales se deforman, de tal forma que la mejor respuesta del hidrófono es en un rango de frecuencias de 3-6 kHz, siendo 3.35 kHz la frecuencia donde se obtuvo la mayor amplitud de la señal detectada (resonancia).

Al emplear onda pulsada para excitar al buzzer se aprecia que las únicas componentes en frecuencias detectadas fueron 3.375 kHz y 5.753 kHz, a pesar de haber realizado el mismo barrido de 3-30 kHz. Es decir, el sensor para onda pulsada es capaz de detectar solo la frecuencia de resonancia y algún otro armónico.

La sensibilidad de los mandriles en términos de la tensión de alimentación al buzzer para onda continua fueron de 6.76 V<sub>pp</sub> y 0.66 V<sub>pp</sub> por cada 1 V<sub>pp</sub> aplicado, para el mandril de aluminio y el mandril de vidrio respectivamente. En el caso de la onda pulsada, la amplitud de la señal detectada es menor a la obtenida con onda continua, 1.54 V<sub>pp</sub> y 0.13 V<sub>pp</sub> por cada 1 V<sub>pp</sub> aplicado, para el mandril de aluminio y el mandril vidrio respectivamente. De estos valores, se puede concluir que la señal detectada por el mandril de aluminio es aproximadamente 10 veces más grande en relación con el de vidrio.

En cuanto a la atenuación de la señal a la frecuencia de resonancia, el cálculo en onda continua fue de -406.20 dB/m (aluminio) y -303.32 dB/m (vidrio), mientras que en onda pulsada fue de -502.35 dB/m (aluminio) y -230.18 dB/m (vidrio), por consiguiente en el mandril de vidrio se obtuvo la menor atenuación. Sin embargo, en ambos casos la atenuación es muy grande, ya que para distancias superiores a 2 cm se pierde más de la mitad de la amplitud inicial, dejando en claro que la fuente

seleccionada tiene muchas pérdidas, al tratarse de un dispositivo que está diseñado para otro medio (aire)

Lamentablemente del análisis de la fase y del tiempo de retardo de la señal, no se pudo establecer una relación para determinar la distancia de separación entre la fuente y el mandril. Para el caso de la señal en onda continua, se observa que solo a la frecuencia de resonancia, las pendientes de fase son las mismas. Sin embargo, el desplazamiento de la posición de la pendiente no se realiza de manera uniforme. Dado que en onda pulsada se detecta las componentes de la frecuencia de resonancia, ocurre algo similar al caso de onda continua, con la diferencia que en muchos casos las pendientes se sobrepone una de la otra. Para este comportamiento entorno a la fase, se tienen muchas hipótesis del por qué no se pudo determinar la distancia de separación. Por ejemplo, las dimensiones de los mandriles son muy grandes, lo que permite que diversos reflejos de la señal sean detectados. Además, el sensor es muy sensible a la fase y cambia muy rápido con las perturbaciones del medio.

Finalmente, al no contar con un hidrófono calibrado en el rango de frecuencias analizadas, con el sonómetro junto a la fuente y a la frecuencia de resonancia, se midió una presión aproximada de  $367.28 \mu\text{Pa}$  que representa la máxima presión correspondiente a cuando el mandril y el buzzer están juntos. Sin embargo, se debe tener en cuenta que el dispositivo está diseñado para detectar niveles de presión sonora en aire.

#### **4.2. Mejoras y trabajos a futuro**

Sin lugar a dudas este trabajo de tesis requiere de mucha más investigación para su correcta implementación e instrumentación así como beneficiarse de sus resultados. Para mejorar la sensibilidad del sensor se pueden realizar muchas cosas, por ejemplo, enrollando más fibra óptica al cilindro que conforma el mandril y cambiar el material por uno más sensible a las vibraciones acústicas, ya que para este estudio se eligieron materiales fáciles de conseguir y de sustituir. Además el agregar más fibra óptica a la bobina de retardo involucraría un mayor ancho de banda, de tal forma que se pueda medir frecuencias más cercanas al ultrasonido.

Por otra parte, es importante aislar el elemento sensor tanto del ruido de fondo como de los reflejos de la señal del campo acústico, para ello se sugiere cambiar el tanque de pruebas a uno de mayor volumen. Además se propone la caracterización de otras fuentes acústicas basadas en algún piezoeléctrico o transductor de inmersión de banda ancha, que permita realizar un barrido en frecuencias más amplio.

Para determinar la distancia entre la fuente y el mandril se busca realizar pruebas agregando un modulador acusto-óptico, demodular y obtener la información producida por la perturbación.

Además, se requiere de un hidrófono calibrado para el rango de frecuencias del campo acústico de estudio y de esta manera obtener una curva de calibración del sensor propuesto.

Como trabajo a futuro, se propone evaluar la directividad del sensor agregando un motor de rotación al sistema de posicionamiento mecánico, para variar la dirección

de la fuente algunos grados y determinar la atenuación de la amplitud de la señal medida con el hidrófono.

Finalmente se busca la implementación de otras configuraciones de interferómetros, como es el caso de un Fabry-Perot construido con un arreglo de rejillas Bragg en fibra óptica. Esta configuración, según la bibliografía consultada presenta una mayor sensibilidad en la cavidad resonante y permite obtener la temperatura de manera simultánea, ya que desplazamiento de la longitud de onda de Bragg depende tanto de la presión como de la temperatura.

## Referencias:

- [1] L. Doležal, C. Kollmann, et al., Efforts of ultrasound in medicine, Grafia Nova, 2012.
- [2] C. Sherman and J. Butler, "Transducer as Hydrophones", Transducers and arrays for underwater sound, Springer, 2007, pp. 152-212.
- [3] R. Preston, Output measurements for medical ultrasound, Springer-Verlag, 1991.
- [4] A. Safari, V. Janas, et al., "Piezoelectric transducers and sensors". Measurement, instrumentation and sensor, CRC Press LLC, 1999, pp. 148-149.
- [5] M. Vijaya, Piezoelectric materials and devices: applications in engineering and medical sciences, CRC Press, 2013.
- [6] A. Hurrell and P. Beard, "Piezoelectric and fibre-optic hydrophones". *Ultrasonic transducers, materials and design for sensors, actuators and medical applications*, K. Nakamura, Woodhead publishing, 2012, pp.619-676.
- [7] M. Plate, A polyvinylidene fluoride needle hydrophone for ultrasonic applications, Ultrasonics, Vol. 23, pp. 113-118 , (1985).
- [8] S. Yin, P. Ruffin, and F. Yu, *Fiber Optic Sensors*, 2<sup>nd</sup> edition, CRC Press, 2008.
- [9] D. Krohn, T. MacDougall and A. Mendez, Fiber optic sensors: fundamentals and applications, SPIE PRESS, 2014.
- [10] P. Morris, A fabry-Perot fiber-optic hydrophone for the characterization of ultrasound fields, PhD thesis, University of London, 2008.
- [11] V. Wilkens and Ch. Koch, Fiber-optic multilayer hydrophone for ultrasonic measurement, Ultrasonics , Vol. 37, pp. 45–49, (1999).
- [12] G. Rajan, Optical fiber sensors: Advanced techniques and applications, CRC Press, 2015.
- [13] G. Righini, A. Tajani and A. Cutolo, An introduction to optoelectronic sensors, World Scientific, 2009.
- [14] G. Wild and S. Hinckley, Optical fiber Bragg gratings for acoustic sensors, proceedings of 20<sup>th</sup> International Congress on Acoustics, Sydney, pp.1-7, (2010).
- [15] G. Wild and S. Hinckley, Acousto-ultrasonic optical fiber sensors: overview and state of the art., IEEE sensors journal, Vol. 8, No. 7, pp. 1184-1193, (2008).
- [16] J. Posada, J. Garcia and J. Rubio, Fiber optic sensor for acoustic detection of partial discharges in oil-paper insulated electrical systems, Sensors, pp. 4793-4802, (2012).
- [17] Z. Wang, Y. Hu, Z. Meng and M. Ni, Fiber-optic hydrophone using a cylindrical Helmholtz resonator as a mechanical anti-aliasing filter, OPTICS LETTERS, Vol. 33, No.1, pp. 37-39, (2007).

- [18] T. Giallorenzi, J. Bucaro, et. al. Optical fiber sensor technology, IEEE transactions on microwave theory and techniques, Vol. mtt-30, no.4, pp. 472-511, (1982).
- [19] T.K. Lim, Y.Zhou , et. Al., Fiber optic acoustic hydrophone with double Mach-Zehnder interferometers for optical path length compensation, Optic communications, Vol.159, pp. 301-308. (1999).
- [20] B. Gholamzadeh and H. Nabovati, Fiber optic sensor, World Academy of Science, Engineering and Technology, Vol. 42, pp. 297-307, (2008).
- [21] P. Morris, et. al., A Fabry-Perot fibre-optic hydrophone for the measurement of ultrasound induced temperature changes, IEEE Ultrasonics Symposium, pp.536-539, (2006).
- [22] P.Morris, A. Hurel, et. al., A Fabry-Perot fiber-optic ultrasonic hydrophone for the simultaneous measurement of temperature and acoustic pressure, J. Acoust. Soc. Am. Vol.125, No.6, pp. 3611-3622, (2009).
- [23] B. Culshaw, The optical fibre Sagnac interferometer: an overview of its principles and applications, Meas. Sci. Technol., Vol. 17, pp.1-16, (2006).
- [24] S. Knudsen and K. Bløtekjær, An ultrasonic fiber-optic hydrophone incorporating a Sagnac Interferometer, Journal of lightwave technology, Vol. 12, No. 9, pp. 1696-1700, (1994).
- [25] <https://www.thorlabs.com/drawings/d123822470459f4e-ED096FBB-A313-3EEB-A96E5100FD4E8FEE/S5FC1005P-SpecSheet.pdf>
- [26] <https://www.thorlabs.com/drawings/d123822470459f4e-ED096FBB-A313-3EEB-A96E5100FD4E8FEE/FPL1009S-SpecSheet.pdf>
- [27] B. Vakoc, M. Dignnet and G. Kino, A novel fiber-optic sensor array based on the Sagnac interferometer. Journal of lightwave technology, Vol. 17, No. 11, pp. 2316-2326, (1999).
- [28] M. Churgin, M. Liu and T. Buma, Fiber optic Sagnac interferometer for characterizing ultrasound biomicroscopy transducers, IEEE International ultrasonics symposium proceedings, pp. 952-955, (2009).
- [29] E. Udd and W.B. Spillman, Fiber optic sensor: An introduction for engineers and scientist, 2th edition, Wiley, 2011.
- [30] T. Liang and Y. Lin, A fiber-optic sensor for the ground vibration detection, Optics Communications, Vol. 306, pp.190–197, (2013).
- [31] M. Vázquez, et al., Noninvasive temperature estimation in oncology hyperthermia using phase changes in pulse-echo ultrasonic signal, Japanese Journal of applied physics, vol. 45, No. 10 A, pp. 7991-7998, (2016).
- [32] R. Farr and P. Allisy-Roberts, "Imaging with Ultrasound", Physics for medical imaging, Saunders, pp.183-214, (2002).
- [33] R. Barron, Industrial noise control and acoustics, Marcel Dekker.USA, 2003. Pp. 42-43.

[34] D. Evans and J. Claiborne, *The physiology of fishes*, Third edition, CRC Press, 2006, pp. 390-391.