

GENERACIÓN DE UNA ONDA CONSTRUCTIVA DENTRO DE UNA TUBERÍA
DE ACERO-CARBONO, MEDIANTE PIEZOACTUADORES EN MODO *PHASED*
ARRAY

NICOLAS CARDOZO ACUÑA
CRISTIAN MAURICIO CHACÓN MARTINEZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA

2020

GENERACIÓN DE UNA ONDA CONSTRUCTIVA DENTRO DE UNA TUBERÍA
DE ACERO-CARBONO, MEDIANTE PIEZOACTUADORES EN MODO *PHASED*
ARRAY

NICOLAS CARDOZO ACUÑA
CRISTIAN MAURICIO CHACÓN MARTINEZ

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO
ELECTRÓNICO

Director:

RODOLFO VILLAMIZAR MEJÍA
PhD. TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN

CODIRECTORA

LEIDY LORENA ARIAS CABEZA

Ing. ELECTRÓNICA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA

2020

DEDICATORIA

Primero quiero dedicar este logro a Dios, que me ha dado fuerzas y serenidad para afrontar todos los problemas que se han presentado en el trayecto de mi vida.

A mis padres por haberme forjado como la persona que soy en la actualidad, por sus consejos, y apoyo incondicional que me han ayudado a alcanzar mis anhelos personales y prontamente profesionales, de igual forma a mi hermana por brindarme su tiempo y amor incondicional.

A mi novia, por estar conmigo en los momentos más difíciles de este proceso, y también por llenar mis días de hermosos recuerdos.

Por ultimo y no menos importante, mis amigos, que me han permitido vivir a su lado grandes momentos de mi vida.

CRISTIAN MAURICIO CHACÓN MARTINEZ

A Dios, que siempre ha estado a mi lado en los momentos buenos y malos.

A mis padres, que gracias a ellos soy quien soy hoy en día.

A mi familia, que me han apoyado en todo este proceso.

A mis amigos, los cuales han aportado su grano de arena para lograr este logro.

NICOLAS CARDOZO ACUÑA

AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos a la señora Yolanda Sarria, que permitió acondicionar su casa para la implementación del proyecto.

A nuestro director Rodolfo Villamizar y codirectora Leidy Lorena Arenas, por su entrega y apoyo durante el desarrollo del trabajo de grado.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	13
1. OBJETIVOS	15
1.1 OBJETIVO GENERAL	15
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
2. JUSTIFICACIÓN	16
3. MARCO TEÓRICO	17
3.1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL ULTRASONIDO	17
3.1.1 Nociones Básicas	17
3.1.2 Impedancia Acústica	19
3.1.3 Fenómenos de la Onda	20
3.1.4 Tipos de ondas Ultrasónicas	24
3.1.5 Comportamiento de los cristales piezoeléctricos	27
3.2 ULTRASONIDO MEDIANTE LA TÉCNICA DE <i>PHASED ARRAY</i>	28
3.2.1 Ley Focal	29
3.2.2 Parámetros importantes de los transductores	33
4. METODOLOGÍA DE CONSTRUCCIÓN DE LA ONDA CONSTRUCTIVA	35
4.1 ESTUDIO DE LAS DIVERSAS CONFIGURACIONES DEL <i>PHASED ARRAY</i>	35
4.2 SECUENCIA DE DISPARO DE LOS PIEZOELÉCTRICOS	37
4.3 CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA (FRECUENCIA DE RESONANCIA)	40
4.3.1 Diseño del filtro pasabanda de banda estrecha	43

4.4 PORCENTAJE DE ENERGÍA TRANSMITIDA Y REFLEJADA EN LAS INTERFACES ACÚSTICAS	45
4.5 CARACTERIZACIÓN DE LOS PIEZOELÉCTRICOS	49
5. DISEÑO EXPERIMENTAL.....	52
6. RESULTADOS EXPERIMENTALES	57
6.1 UBICACIÓN VERTICAL.....	57
6.2 UBICACIÓN HORIZONTAL	61
6. CONCLUSIONES.....	66
7. RECOMENDACIONES	68
BIBLIOGRAFÍA.....	69
ANEXOS	72

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Características del haz.....	34
Tabla 2. Tiempo de activación correspondiente a cada piezo-actuador, para $\theta = \frac{\pi}{6}$	38
Tabla 3. Tiempo de activación correspondiente a cada piezo-actuador, para $\theta = \frac{\pi}{4}$	39
Tabla 4. Tiempo de activación correspondiente a cada piezo-actuador, para $\theta = \frac{\pi}{3}$	40
Tabla 5. Caracterización del sistema	42
Tabla 6. Propiedades de los medios.....	46
Tabla 7. Impedancia acústica de los medios.....	46
Tabla 8. Interface acústica	46
Tabla 9. Comparación de la señal reflejada y transmitida, con dos medios al interior de la tubería	48
Tabla 10. Caracterización de los piezoelectricos	50
Tabla 11. Configuración <i>phased array</i> , según caracterización de los piezoelectricos	51
Tabla 12. Posiciones del sensor	54
Tabla 13. Posición del sensor, respecto a la apertura del <i>phased array</i>	55
Tabla 14. Posiciones con mayor intensidad de señal percibida, para diferentes ángulos.....	56
Tabla 15. Media aritmética e imprecisión absoluta de las pruebas, para $\theta = \frac{\pi}{6}$	58

Tabla 16. Media aritmética e imprecisión absoluta de las pruebas, para $\theta = \frac{\pi}{4}$ 59

Tabla 17. Media aritmética e imprecisión absoluta de las pruebas, para $\theta = \frac{\pi}{3}$ 60

Tabla 18. Media aritmética e imprecisión absoluta de las pruebas, para $\theta = \frac{\pi}{6}$ 62

Tabla 19. Media aritmética e imprecisión absoluta de las pruebas, para $\theta = \frac{\pi}{4}$ 63

Tabla 20. Media aritmética e imprecisión absoluta de las pruebas, para $\theta = \frac{\pi}{3}$ 64

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Frentes de Onda	18
Figura 2. Reflexión de una Onda	20
Figura 3. Refracción de una Onda	22
Figura 4. Difracción de la Onda.....	22
Figura 5. Efecto de interferencia de Onda.....	23
Figura 6. Absorción de una onda	24
Figura 7. Ondas Longitudinales	25
Figura 8. Ondas Transversales.....	26
Figura 9. Ondas Superficiales o Rayleigh.....	26
Figura 10. Comportamiento del cristal sobre una superficie, cuando se ha excitado eléctricamente.....	27
Figura 11. Comportamiento de dos cristales, alrededor de un material. (Emisor y receptor).....	28
Figura 12. Trayectos geométricos del sonido desde el centro de los elementos del transductor hasta el punto focal	30
Figura 13. Haz de enfoque para incidencia normal y angular	30
Figura 14. Parámetros dimensionales de la sonda <i>phased array</i>	32
Figura 15. Arreglo matricial	35
Figura 16. Arreglo anular segmentado	36
Figura 17. Arreglo Lineal	36
Figura 18. Forma del frente de onda con determinada orientación.....	38
Figura 20. Caracterización del sistema.....	43

Figura 21. Espectro de la señal original.....	44
Figura 22. Espectro de la señal filtrada	45
Figura 23. Montaje de ultrasonido convencional, para determinar el medio más adecuado al interior de la tubería de acero-carbono.....	47
Figura 24. Espectro de la señal recibida, como Medio 1: Acero Carbono y Medio 2: agua	48
Figura 25. Diseño experimental	52
Figura 26. Posiciones de los sensores, para verificar el ángulo de inclinación	53
Figura 28. Representación gráfica de la media aritmética, para $\theta = \frac{\pi}{6}$	58
Figura 29. Representación gráfica de la media aritmética, para $\theta = \frac{\pi}{4}$	59
Figura 30. Representación gráfica de la media aritmética, para $\theta = \frac{\pi}{3}$	60
Figura 32. Representación gráfica de la media aritmética, para $\theta = \frac{\pi}{6}$	62
Figura 33. Representación gráfica de la media aritmética, para $\theta = \frac{\pi}{4}$	63
Figura 34. Representación gráfica de la media aritmética, para $\theta = \frac{\pi}{3}$	64

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. INSTRUMENTACIÓN	72
ANEXO B. CONEXIÓN ENTRE EL MULTIPLEXOR/DEMULTIPLEXOR CD4051BE Y ARDUINO UNO	79
ANEXO C. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS REALIZADAS	80

RESUMEN

TÍTULO: GENERACIÓN DE UNA ONDA CONSTRUCTIVA DENTRO DE UNA TUBERÍA DE ACERO-CARBONO, MEDIANTE PIEZO-ACTUADORES EN MODO *PHASED ARRAY*.¹

AUTORES: NICOLÁS CARDOZO ACUÑA

CRISTIAN MAURICIO CHACON MARTINEZ²

PALABRAS CLAVE: *PHASED ARRAY*, ULTRASONIDO, PIEZO-ACTUADORES.

DESCRIPCIÓN:

En este trabajo se presenta la metodología seguida para obtener una onda de ultrasonido constructiva a partir del montaje de varios piezo-actuadores sobre la superficie de una tubería de acero-carbono en modo *phased array*³. Este modo consiste en activar individualmente cada uno de los piezoeléctricos instalados, con un tiempo de retardo de tal manera que se creen frentes de onda que al combinarse entre sí, forman un haz de sonido con un ángulo de destino conocido para lograr impactar un punto focal al interior de la tubería. Actualmente el ultrasonido es una técnica que permite inspeccionar defectos como grietas, falta de fusión, porosidad, que para el ojo humano no es de fácil detección [2]. Sin embargo, el enfoque de este proyecto es lograr una onda acústica con determinada orientación, que permita posteriormente realizar un trabajo de grado para estimar el flujo volumétrico de elementos sólidos (cavings) que fluyen juntamente con lodo en el canal de conducción, durante la perforación de hidrocarburos.

¹ Trabajo de Grado

² Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: Rodolfo Villamizar Mejía, PhD. Tecnologías de la información.

³ *PHASED ARRAY*: Sistema que utiliza el principio de la física de eliminación gradual de la onda, variando el tiempo entre una serie de impulsos ultrasónicos salientes, de tal manera que los frentes de onda individuales generados por cada elemento de la matriz se combinan entre sí para añadir o cancelar la energía de forma predecible que orientan y dan forma al haz de sonido con eficacia. Tomado de Rueda, J., Caez, J. (2019).

ABSTRACT

TITLE: GENERATION OF A CONSTRUCTIVE WAVE INSIDE A CARBON STEEL PIPE, THROUGH PIEZO ACTUATORS IN *PHASED ARRAY* MODE.⁴

AUTHORS: NICOLÁS CARDOZO ACUÑA

CRISTIAN MAURICIO CHACON MARTINEZ⁵

KEYWORDS: *PHASED ARRAY*⁶, ULTRASOUND, PIEZO ACTUATORS.

DESCRIPTION:

This project presents a methodology to obtain a constructive ultrasound wave by assembling several piezo-actuators on the surface of a carbon-steel pipe in *phased array* mode. This mode consists of activating individually each of the installed piezoelectrics with a time delay, in order to combine wave fronts that form a sound beam with a known target angle, which is used to hit a focal point inside of the pipe. Nowadays ultrasound is a known technique that allows to inspect defects such as cracks, lack of fusion, porosity, among others, that are not easy to detect for the human eye. However, the focus of this project is to build a wave with specific orientation and direction that could be used in a master degree work to estimate the volumetric flow of solid elements (cavings) flowing together with mud in the conduit channel during hydrocarbon drilling.

⁴ Bachelor Thesis

⁵ Physics Mechanical Engineering Faculty. Electric, Electronic and Telecommunications School. Director: Rodolfo Villamizar Mejía, PhD. Information Technology.

⁶ PHASED ARRAY: System that uses the physical principle of phasing out of the wave. It consists of varying the time between series of outgoing ultrasonic pulses, in such a way that the individual wavefronts generated by each element of the matrix are combined with each other to add or cancel the energy in a predictable way that gives orientation and shape the sound beam effectively.

INTRODUCCIÓN

Durante mucho tiempo los métodos de inspección al interior de tuberías y materiales de difícil observación para el ojo humano, han tomado gran importancia en la industria actual. Algunos de estos métodos son altamente efectivos, sin embargo, su uso continuo puede ocasionar efectos perjudiciales a la integridad del operario, como ejemplo los Rayos x, debido a su exposición a la radiación ionizante. Razón por la que se han generado alternativas de medición como las técnicas acústicas, con bajos efectos negativos en la salud del operario y mínimamente intrusivas.⁷

Una de estas alternativas es el uso de Ensayos No Destructivos (END), el cual permite inspeccionar imperfecciones y porosidades en tuberías, sin alterar las propiedades físicas del material. Una forma de ensayo no destructivo es la inspección por ultrasonido, quien se basa en la medición de la propagación del sonido en el medio de la pieza a analizar, y tiene aplicación en todo tipo de materiales.⁸ Uno de los métodos utilizados en END, es la inspección a partir de un método llamado *phased array*, el cual consiste en la utilización de un arreglo de piezoeléctricos, que generan una onda constructiva direccionada con un ángulo específico.

En el año 2016, una investigación fue desarrollada entre la Universidad Industrial de Santander y el Instituto Colombiano del Petróleo - ICP. Con el propósito de elaborar un modelo de laboratorio experimental, el cual tenía como objetivo la estimación del flujo volumétrico de cavings, basado en el efecto Doppler. Esto se hacía, utilizando dos dispositivos piezoeléctricos, para la generación de un enlace ultrasónico (transmisor-receptor) sobre una tubería de PVC, con el fin de detectar la cantidad de cortes y derrumbes de perforación que pasaban a través de dicha

⁷ INFOCATEC. Técnica de inspección por ultrasonidos phased array para la detección de defectos en materiales. p. 1, 2012.

⁸ RIMOLDI, Claudio y MUNDO, Luis Mariano. 2012. Cátedra: Ensayos no destructivos. Apunte de clase. Ensayo no destructivo por método de ultrasonido.

tubería.⁹ Por lo tanto, en base con los resultados anteriores, el presente proyecto tiene como objetivo lograr una onda acústica con una orientación determinada en materiales similares a las líneas de flujo utilizadas en campo como lo es el acero-carbono. Para lograr dicha orientación, los piezo-actuadores deberán configurarse en modo *phased array*, y activarse con un tiempo de retardo correspondiente para dar forma al frente de onda resultante.

⁹ CAEZ ORTIZ, Jesus y RUEDA BAUTISTA, Jeiver. Metodología Para La Inspección Y Detección De Fallas En Placas Grandes De Acero (Acero 1020 Y Acero Inoxidable Serie 300 Aisi), Mediante El Uso De La Técnica De Ultrasonido Phased Array. Proyecto de grado para optar el título de ingeniero mecánico. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingeniería físico-mecánicas, 2019.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

- Generar una onda de ultrasonido constructiva con un determinado ángulo de incidencia al interior de una tubería de acero-carbono, a partir de la configuración de piezo-actuadores en modo *phased array*.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- **OE1.** Determinar la configuración de piezo-actuadores más adecuada para la detección de objetos al interior de una tubería usando la técnica de *phased array*.
- **OE2.** Establecer la secuencia de encendido de los actuadores configurados en modo *phased array*, para generar una onda constructiva direccionada con un ángulo específico.
- **OE3.** Verificar el ángulo de incidencia de la onda generada sobre la tubería de acero-carbono.

2. JUSTIFICACIÓN

Los sistemas de inspección por acústica al interior de piezas de difícil acceso y con materiales de diversas propiedades, prometen ser una tecnología eficaz, de bajo costo y mínimamente intrusiva. Por ejemplo, el ultrasonido puede ser ampliamente utilizado en análisis de fallas en tuberías por deterioro, corrosión o esfuerzo físico. Así como también, en la estimación del flujo que pasa a través de una tubería. Esta última aplicación, es ampliamente utilizada en las industrias, sobre todo cuando el fluido contiene partículas o elementos suspendidos en él.

Al momento de la perforación de un pozo, se lleva hacia la superficie cortes y derrumbes con ayuda de lodo bombeado al interior de la tubería, y es de gran interés para los geomecánicos, saber la cantidad de dichos cortes y derrumbes con el fin de garantizar la estabilidad del pozo. Este fluido es arrastrado a través de tuberías que normalmente están hechas de acero u otros materiales que poseen las mismas propiedades.

Para obtener la medición del flujo basado en el efecto Doppler, se requiere atravesar una onda direccionada al interior de la tubería de acero-carbono. A partir de dicha necesidad, se desarrolla este proyecto siendo una etapa previa para lograr la estimación de cortes y derrumbes de perforación, determinando la secuencia de disparo de un grupo de piezo-actuadores en modo *phased array*. Se estudiará el arreglo de forma vectorial en diversas configuraciones alrededor de la tubería.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL ULTRASONIDO

Los ultrasonidos son una serie de ondas acústicas que, pueden ser tipo elástico (o mecánico), generalmente longitudinales, que requieren un medio (sólido, líquido o gaseoso) para propagarse. Esto es debido a que el medio elástico se deforma y se recupera vibrando al paso de la onda. Se denominan así, debido a su frecuencia de resonancia, quien está por encima de la capacidad de audición del oído humano, es decir, frecuencias superiores a los 20kHz.

Las aplicaciones tecnológicas del ultrasonido son numerosas: Medición de distancias, espesores, detección de defectos en soldaduras, y reconocimiento de objetos, solo por nombrar algunas, las que consisten en interpretar los cambios producidos en las ondas ultrasónicas a su paso por el material, permitiendo así deducir las características mecánicas, físicas o geométricas de éste. De igual forma, conociendo el tiempo de tránsito de la onda viajar por el medio, es posible determinar la ubicación de defectos, tales como poros, grietas, calidad de las uniones, entre otros.

3.1.1 Nociones Básicas

A continuación, se presentan términos que se mencionan de forma constante durante el estudio y serán de gran importancia en el comportamiento de las ondas.

-Onda: Es la propagación de energía en el espacio debido a la perturbación de alguna de sus propiedades físicas, como son la densidad, presión, campo eléctrico o campo magnético.

-Oscilación: Es el movimiento repetido en torno a una posición central, o posición de equilibrio.

-Período (T): Tiempo necesario para llevar a cabo una oscilación.

-Frecuencia (f): Número de veces que se repite un ciclo en 1s (se puede considerar el inverso del período).

-Velocidad de propagación: Es la magnitud que mide la velocidad a la que se propaga la perturbación de la onda a lo largo de su desplazamiento. La velocidad a la que se propaga la onda depende tanto del tipo de onda como del medio por el que esta se propaga.

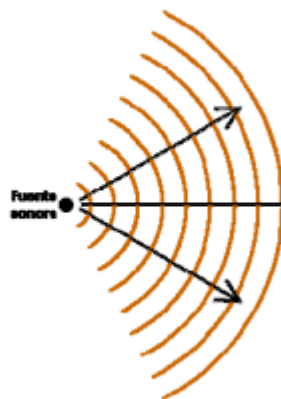
-Longitud de onda (λ): Es la distancia real que recorre una perturbación (una onda) en un determinado intervalo de tiempo.

Si el fenómeno se propaga con una velocidad v y una frecuencia f , entonces se tiene:

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (3.1)$$

-Frente de onda: Se define como el lugar geométrico que une todos los puntos que, en un instante dado, se encuentran en idéntico estado de vibración, es decir, tienen igual fase.

Figura 1. Frentes de Onda



Fuente: Rimoldi, Claudio y Mundo, Luis Mariano. Frente de onda [figura]. Apunte ultrasonido. Facultad de Ingeniería: Departamento de Aeronáutica. 2012. P. 5.

-Dirección del haz: Es la capacidad de un sistema de *phased array* para barrer electrónicamente el haz a través de un rango de ángulos incidentes.

3.1.2 Impedancia Acústica

Otro concepto importante es la impedancia acústica (Z), que es una propiedad que depende de la densidad del material a través del cual se propaga la onda ultrasónica; por consiguiente, una mayor impedancia indica una mayor densidad del material y viceversa. El concepto anterior se encuentra expresado en la siguiente ecuación.

$$Z = \rho * V \quad (3.2)$$

Donde:

Z = Impedancia acústica.

ρ = Densidad del material.

V = Velocidad de propagación.

La impedancia acústica también es importante, ya que participa en la transmisión y reflexión de las ondas, es decir, permite calcular el porcentaje de energía teórica transmitida y reflejada en las interfaces acústicas.

Por consiguiente, entre mayor sea la diferencia de las impedancias acústicas entre el medio 1 y medio 2, mayor será el porcentaje de reflexión.

La cantidad de energía reflejada y transmitida, están dadas de la siguiente manera:

$$R = \text{Factor de reflexión} = \left(\frac{z_1 - z_2}{z_1 + z_2} \right)^2, \%R = R * 100 \quad (3.3)$$

$$T = \text{Factor de transmisión} = 1 - R = \frac{4z_1 z_2}{(z_1 + z_2)^2}, \%T = T * 100 \quad (3.4)$$

Donde:

R = Coeficiente de Reflexión.

T = Coeficiente de Transmisión.

z_1 = Impedancia acústica en el medio 1.

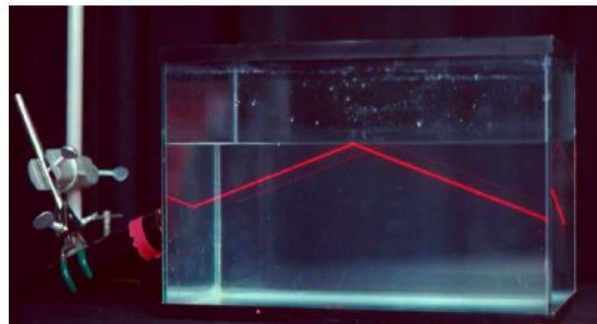
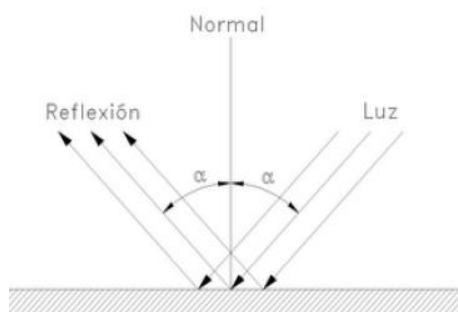
z_2 = Impedancia acústica en el medio 2.

3.1.3 Fenómenos de la Onda

La propagación de las ondas depende del medio en el cual interactúan, por ende, ocasiona que éstas se propaguen de manera diferente. Es decir, presentan diversos fenómenos cuando pasan de un medio a otro. Es por ello que es muy importante conocer y analizar algunos de estos fenómenos que permitirán interpretar de una mejor manera el comportamiento del haz ultrasónico.

- **Reflexión.** Este fenómeno ocurre cuando se incide una Onda sobre una superficie que posee propiedades elásticas diferentes al medio en que se propagan. Parte de su energía es reflejada por esa superficie en dirección que forma, con la normal a la superficie, el mismo ángulo que formaba la onda incidente.

Figura 2. Reflexión de una Onda



Fuente: Rimoldi, Claudio y Mundo, Luis Mariano. Frente de onda [figura]. Apunte ultrasonido. Facultad de Ingeniería: Departamento de Aeronáutica. 2012. P. 11.

-Transmisión. La señal que no es reflejada penetra en el segundo medio, con dirección distinta al de la onda incidente (ver figura 3), pero tal que la relación entre los senos de los ángulos, respecto a la normal, que forma el rayo incidente y el que atraviesa sea constante. Entonces, la ley de Snell relaciona el ángulo de la onda incidente con el de la onda refractada directamente con las velocidades del sonido en ambos medios.

$$\frac{\text{sen}(i)}{\text{sen}(r)} = \frac{V_1}{V_2} \quad (3.5)$$

Donde:

i : Ángulo de incidencia de la onda incidente.

r : Ángulo de incidencia de la onda refractada.

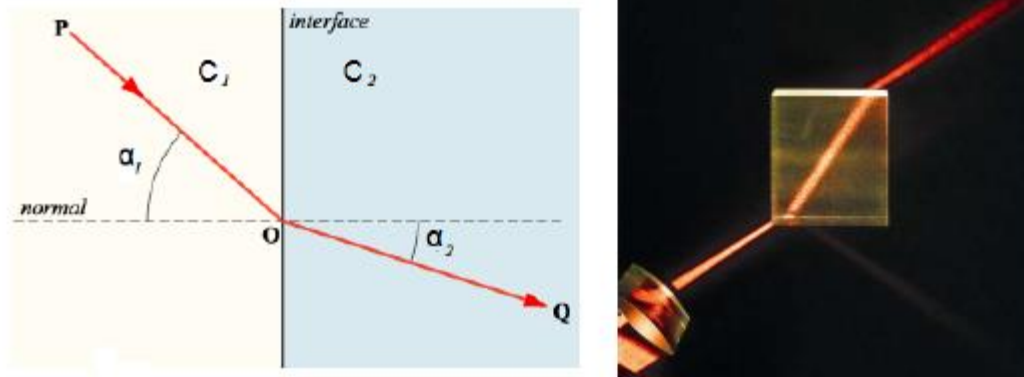
V_1 : Velocidad del sonido en el medio de la onda incidente.

V_2 : Velocidad del sonido en el medio de la onda refractada.

Esta fórmula es aplicable a todo tipo de ondas, independientemente de que la onda se haya reflejado o transmitido.

Pero para el estudio de una onda que se refleja, la relación de las velocidades es igual a 1. Esto es consecuente a que la señal sigue en el mismo medio. Es por ello que el ángulo de la onda reflejada es igual al ángulo de la onda incidente.

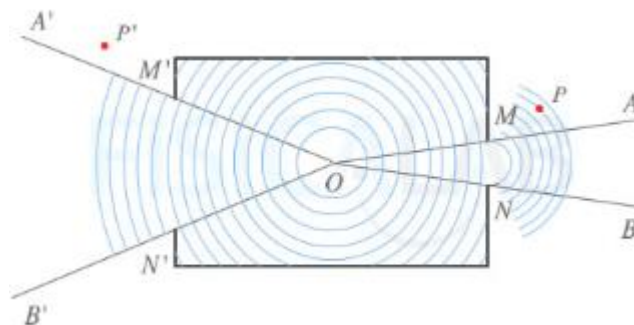
Figura 3. Refracción de una Onda



Fuente: Rimoldi, Claudio y Mundo, Luis Mariano. Frente de onda [figura]. Apunte ultrasonido. Facultad de Ingeniería: Departamento de Aeronáutica. 2012. P. 5.

-Difracción. Es el fenómeno ondulatorio que ocurre cuando una onda se reproduce al atravesar una abertura u orificio. Tiene lugar cuando el tamaño del orificio es del mismo orden que la longitud de onda del movimiento ondulatorio.

Figura 4. Difracción de la Onda



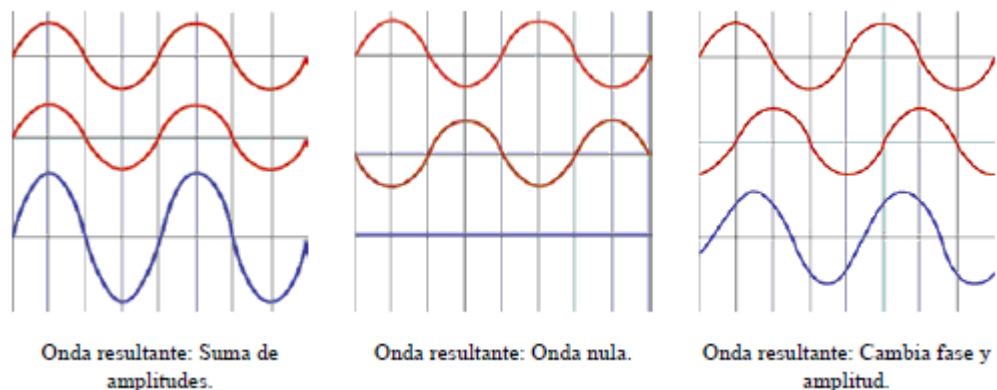
Fuente: Fernández, José L. Difracción de una onda [figura]. FISICALAB. [Consultado: 10 de junio de 2020]. Disponible en: <https://www.fisicalab.com/apartado/difraccion-ondas#contenidos>.

- Si el orificio es muy grande respecto a la longitud de onda (izquierda de la figura 4), las ondas se propagan solamente dentro del cono A'OB' y, por consiguiente, en los puntos situados fuera de dicho cono, punto P' por ejemplo, no se experimentará perturbación.

- Por lo contrario, si el orificio es pequeño (derecha de la figura 4), del orden de la longitud de onda, se engendra en él como centro, un foco emisor de ondas, propagándose estas en todas direcciones. El punto P recibe la perturbación, a pesar de estar el rayo OP interceptado por la pared. Todo sucede como si, al llegar al orificio, los rayos se doblaran (difracción) en todas las direcciones.

-Interferencia. Este fenómeno ocurre cuando las ondas de sonido son originadas simultáneamente desde distintos puntos, o fuentes. Ocasionando así un solapamiento de las diferentes ondas y como consecuencia a esto se produce una onda resultante diferente a las ya originadas. Las siguientes figuras ilustran el fenómeno descrito.

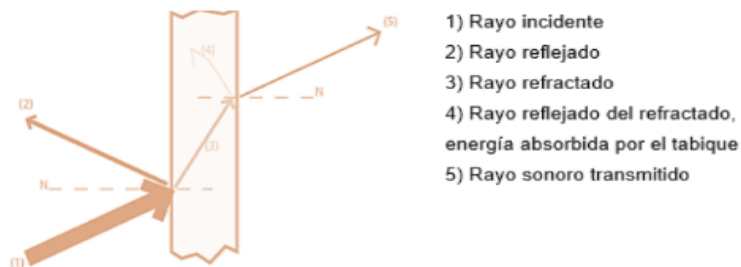
Figura 5. Efecto de interferencia de Onda



Fuente: Rimoldi, Claudio y Mundo, Luis Mariano. Frente de onda [figura]. Apunte ultrasonido. Facultad de Ingeniería: Departamento de Aeronáutica. 2012. P. 13.

-Absorción. Cierta parte de la energía acústica disminuye debido a las pérdidas por fricción, convirtiéndose en calor, este fenómeno es denominado como ABSORCIÓN. Materiales con alta fricción interna, igual a alta absorción, se utilizan como amortiguadores acústicos.

Figura 6. Absorción de una onda



Fuente: Caez Ortiz, Jesus David y Rueda Bautistia, Jeiver Hair. Absorción de una onda [figura]. Metodología para la inspección y detección de fallas en placas grandes de Acero (Acero 1020 y Acero inoxidable serie 300 AISI), mediante el uso de la técnica del ultrasonido *phased array*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander: Facultad de Ingenierías Físicas Mecánicas. 2019. P. 28.

3.1.4 Tipos de ondas Ultrasónicas

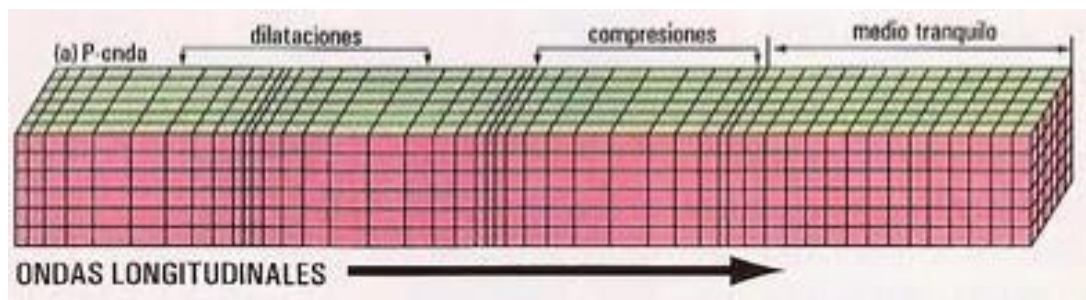
Para clasificar las ondas, se deben analizar conceptos y aspectos como lo son el movimiento de sus partículas respecto a la dirección con la que se propagan en el medio. De acuerdo con esto, se analizará el tipo de ondas que se presentan a razón de su propagación.

Entonces, la dirección de propagación de una onda ultrasónica y la dirección de vibración de las partículas en un medio son independientes entre sí. De acuerdo

con lo anterior se permite identificar los diferentes tipos de ondas respecto a la oscilación que tienen sus partículas. Existen tres tipos de ondas que pueden presentarse en ensayos no destructivos por ultrasonido.

-Ondas longitudinales: Las partículas vibran en la dirección de propagación de la onda. Éstas pueden propagarse en sólidos, líquidos y gases. Son utilizadas para medición de espesores, y se caracterizan por ser de mayor velocidad de propagación en comparación con las transversales.

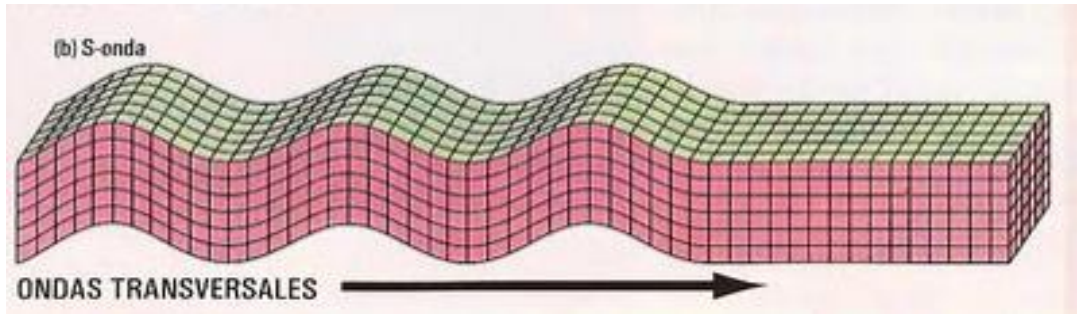
Figura 7. Ondas Longitudinales



Fuente: Sin autor. Ondas Sísmicas [figura]. En: Puntos activos de la tierra, terremotos, sismos y fallas. [Consultado: 12 de junio de 2020]. Disponible en: <http://placasdenuestroplaneta.blogspot.com/2015/11/ondas-sismicas.html>,

-Ondas transversales: El movimiento de las partículas es perpendicular a la dirección de propagación de la onda. La velocidad de una onda transversal es aproximadamente la mitad de una onda longitudinal. Éstas se utilizan para detectar discontinuidades que no están orientadas de forma paralela a la superficie de prueba. Solo se pueden utilizar en elementos sólidos a excepción de líquidos de alta viscosidad.

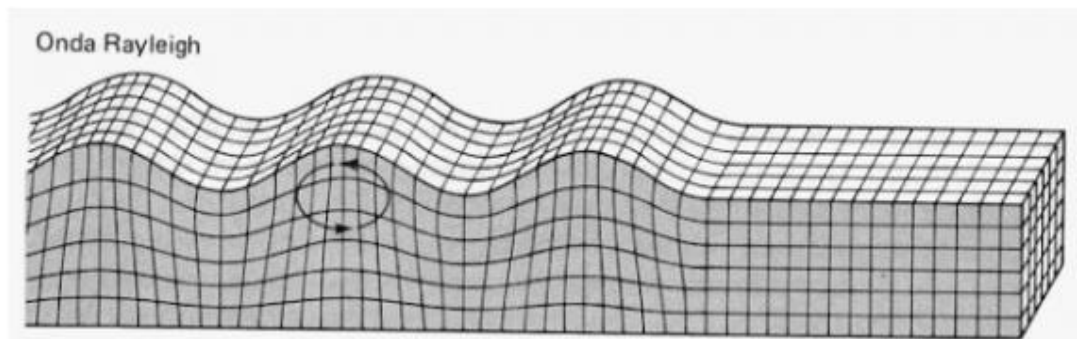
Figura 8. Ondas Transversales



Fuente: Sin autor. Ondas Sísmicas [figura]. En: Puntos activos de la tierra, terremotos, sismos y fallas. [Consultado: 12 de junio de 2020]. Disponible en: <http://placasdenuestroplaneta.blogspot.com/2015/11/ondas-sismicas.html>.

-Ondas Superficiales o Rayleigh: Existe un tipo de ondas ultrasónicas que se propagan por la superficie del material, en consecuencia, a esto la penetración de la onda hacia el interior del material es nula, esto es debido a que se propagan en una región no superior a una longitud de onda por debajo de la superficie del material. Estas ondas son denominadas Ondas superficiales. Las partículas vibran siguiendo un movimiento elíptico, debido a que se producen fuerzas que no están en equilibrio en la superficie del material originando así las ondas Rayleigh.

Figura 9. Ondas Superficiales o Rayleigh

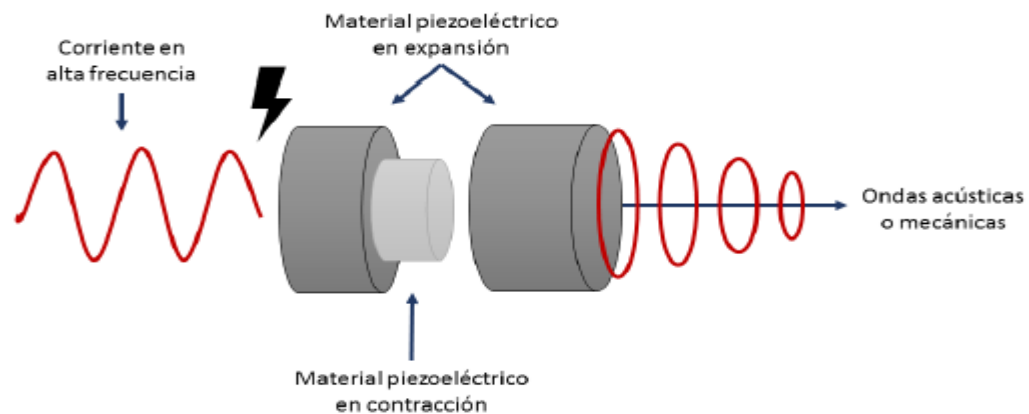


Fuente: Cervantes, Miguel. Onda Rayleigh [figura]. Tipos de ondas mecánicas. Ondas mecánicas, sonido y el oído. 2016. [Consultado: 12 de junio de 2020]. Disponible en: <https://httpfisica.wordpress.com/2016/11/03/5-1-tipos-de-ondas-mecanicas/>.

3.1.5 Comportamiento de los cristales piezoeléctricos

Los piezoeléctricos se excitan mediante una fuente de corriente alterna normalmente a una frecuencia de resonancia, debido a que cuando un cuerpo o sistema es excitado a su frecuencia de resonancia su vibración será la máxima. Entonces al aplicar la corriente al piezoeléctrico provoca contracción y expansión de la red cristalina (ver figura 10) del material, transformando la energía recibida en vibraciones mecánicas equivalentes a la frecuencia aplicada.

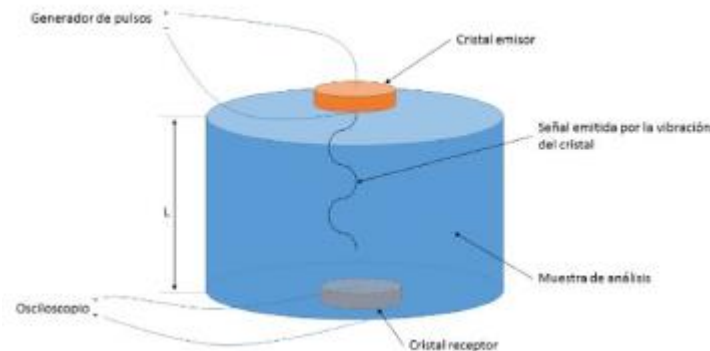
Figura 10. Comportamiento del cristal sobre una superficie, cuando se ha excitado eléctricamente



Fuente: Arias Cabeza, Leidy Lore. Comportamiento del cristal sobre una superficie, cuando se ha excitado eléctricamente [figura]. Estimación del flujo volumétrico de cortes y derrumbes de perforación, usando técnicas de ultrasonido. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander: E3T. 2019. P 14.

Para analizar un material por técnicas acústicas, se deben de ubicar por lo menos dos piezoeléctricos, uno como emisor y el otro como receptor, como se puede observar en la figura 11. Al piezoeléctrico emisor se le aplica una corriente alterna para que transforme su energía eléctrica en energía mecánica, es decir, en vibraciones mecánicas o acústicas que serán transmitidas a través del material, el piezoeléctrico receptor percibe las vibraciones generadas por el emisor y las transforma en corriente que pueden ser medida, para luego realizar el respectivo análisis de datos.

Figura 11. Comportamiento de dos cristales, alrededor de un material. (Emisor y receptor)



Fuente: Arias Cabeza, Leidy Lore. Comportamiento del cristal sobre una superficie, cuando se ha excitado eléctricamente [figura]. Estimación del flujo volumétrico de cortes y derrumbes de perforación, usando técnicas de ultrasonido. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander: E3T. 2019. P 21.

3.2 ULTRASONIDO MEDIANTE LA TÉCNICA DE *PHASED ARRAY*

Los sistemas *phased array* por ultrasonidos consisten en varios elementos transductores individuales. Al excitar cada elemento individual en un determinado frente de onda temporal se puede inclinar, enfocar o combinar ambos. Los frentes

de onda generado de forma individualmente de cada elemento se combinan entre sí para añadir o cancelar la energía de forma predecible que orientan y dan forma al haz de sonido con eficacia¹⁰.

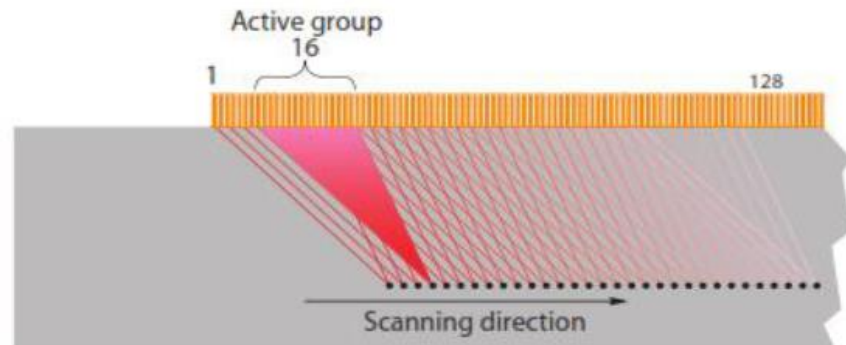
Para ello es necesario excitar cada elemento individual con un tiempo de retardo específico. El estado del arte de la técnica para calcular este conjunto de retardos, que se denomina "ley focal", se basa tradicionalmente en la acústica geométrica. Por lo tanto, la forma del frente de onda resultante depende significativamente de la "ley focal". Así que, el punto focal correspondiente se denomina "foco geométrico". De hecho, este foco geométrico es el único foco que puede definirse con un sistema comercial de *phased array* hoy en día.

3.2.1 Ley Focal

En el caso de la aproximación geométrica, toda la apertura se aproxima por una sola fuente puntual en el centro del elemento transductor y por consiguiente el medio que hay entre el elemento y el punto focal se reducirá a una línea recta. Por lo tanto, el tiempo de tránsito depende únicamente de la distancia que existe entre el centro de apertura en el transductor y el punto focal, así como de la velocidad del sonido.

¹⁰ ARIAS CABEZA, Leidy Lorena. ESTIMACIÓN DEL FLUJO VOLUMÉTRICO DE CORTES Y DERRUMBES DE PERFORACIÓN, USANDO TÉCNICAS DE ULTRASONIDO. [en línea] Universidad Industrial de Santander, 2020, 45 p.

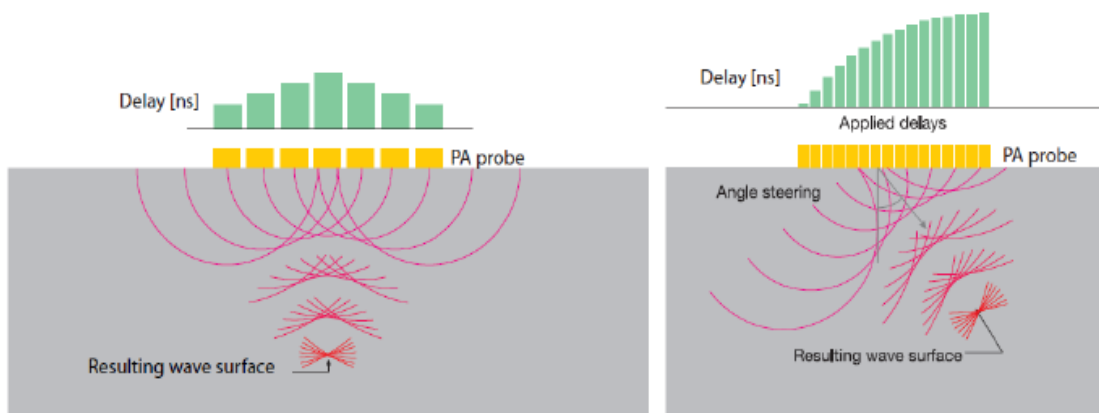
Figura 12. Trayectos geométricos del sonido desde el centro de los elementos del transductor hasta el punto focal



Fuente: OLYMPUS. Trayectos geométricos del sonido desde el centro de los elementos del transductor hasta el punto focal [figura]. Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications. [Consultado: 14 de junio de 2020]. Disponible en: https://www.olympus-ims.com/es/resources/738-search-resourcecontenttype.Books_738-search-submit.1.html#!search.

En esta sección se analizarán las fórmulas correspondientes para dar forma al frente de onda que se muestran en la figura 13, de acuerdo con la “ley focal”.

Figura 13. Haz de enfoque para incidencia normal y angular



Fuente: OLYMPUS. Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications [figura]. 2017. p11

Con estos elementos se realiza un arreglo 1xN en la matriz modo *phased array* con un ángulo de incidencia θ conocido. Por consiguiente, para dar forma a un frente de onda enfocado a un punto focal (ver figura 13, izquierda) de distancia F y ($\theta=0^\circ$), el tiempo de retardo de activación de los transductores puede realizarse con la siguiente fórmula:

$$t_n = \frac{F}{c} \left[1 - \sqrt{1 + \left(\frac{np}{F}\right)^2} \right] + t_0 \quad (3.6)$$

Además, el frente de onda puede inclinarse si el retardo de tiempo entre los elementos adyacentes se realiza de manera secuencial y constante, por lo tanto, el tiempo de fase de cada elemento esta dado de la siguiente manera:

$$t_n = n \frac{p}{c} \sin(\theta) + t_0 \quad (3.7)$$

$$n = 1, \dots, N \quad (3.8)$$

(N: Número de elementos del arreglo; n: elemento bajo consideración, p: pitch; c: velocidad del sonido; θ : Ángulo de inclinación).

Cada elemento de la matriz compuesta de piezoeléctricos se activa en momentos diferentes y al ser activados con diferente fase crea un haz con un ángulo específico enfocado y con una profundidad específica. Entonces, para generar un frente de onda direccionado a un punto focal con distancia F y ángulo θ (ver figura 13, derecha), el tiempo de fase de cada uno de los transductores está dada por la

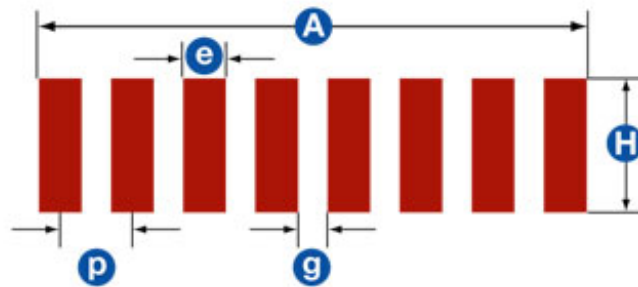
ecuación (3.9).

$$t_n = \frac{F}{c} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\tilde{N}p}{F}\right)^2 + \frac{2\tilde{N}p}{F} \sin(\theta)} - \sqrt{1 + \left(\frac{(n-\tilde{N})p}{F}\right)^2 - \frac{2(n-\tilde{N})p}{F} \sin(\theta)} \right] \quad (3.9)$$

$$\tilde{N} = \frac{N-1}{2} \quad (3.10)$$

El cálculo del tiempo de retardo de activación de los piezo actuadores (ley focal), requiere la utilización de la aproximación geométrica, donde el único parámetro geométrico que afecta dicho cálculo es el paso o distancia centro a centro entre dos elementos consecutivos (figura 14).

Figura 14. Parámetros dimensionales de la sonda *phased array*



Fuente: OLYMPUS. Dimensional Parameters of Phased Array Probe [figura]. Phased Array Transducer Characteristics [Consultado: 30 de junio de 2020]. Disponible en: <https://www.olympus-ims.com/en/ndt-tutorials/transducers/pa-definitions/>.

Donde:

N: Es el número total de elementos en el arreglo

A: Apertura o elementos totales activos.

H: Altura del elemento o elevación.

P: Paso, o distancia de centro a centro entre dos elementos consecutivos.

e: Ancho de un elemento individual.

g: Espaciamiento entre elementos activos.

Las distintas configuraciones en modo *phased array* suelen estar constituidas de 16 a 128 elementos, y algunas de hasta 256. Un mayor número de elementos aumenta

la capacidad de enfoque y dirección, y puede aumentar también la cobertura del área, pero de igual manera implica que aumenten los costos tanto de la sonda como de la instrumentación.

3.2.2 Parámetros importantes de los transductores

- **Frecuencia:** La frecuencia con la que se excitan los transductores tiene un efecto significativo en la longitud del campo cercano y la dispersión del haz. En la práctica, las frecuencias más altas pueden proporcionar una mejor relación señal / ruido que las frecuencias más bajas, ya que ofrecen un enfoque potencialmente más nítido y, por lo tanto, un punto focal más ajustado y optimizado.
- **Tamaño del elemento:** A medida que disminuye el tamaño de los elementos individuales en una matriz, aumenta su capacidad de dirección del haz.
- **Número de elementos:** A medida que aumenta el número de elementos en una matriz, también puede aumentar el área de cobertura física del arreglo y su sensibilidad, capacidad de enfoque y capacidad de dirección.
- **Pitch:** Es la distancia entre los centros de dos elementos adyacentes del arreglo.

Para el estudio y generación del haz resultante, existen diversos conceptos que influyen en las características de éste, es por ello que se pueden resumir de la siguiente manera:

Tabla 1. Características del haz

Disminuyendo el pitch y la anchura de los elementos con el número de elementos constante	Aumenta la capacidad de dirección del rayo
Aumentando el pitch o la frecuencia	Crea lóbulos de rejilla no deseados
Aumentando el ancho de los elementos	Crea lóbulos laterales (como en el UT convencional), reduce la dirección del rayo
Aumentando la apertura activa mediante el uso de muchos elementos pequeños con un pitch pequeño	Aumenta el factor de enfoque (la nitidez del rayo)

Fuente: OLYMPUS. PHASED ARRAY TUTORIAL [figura]. [Consultado: 15 de junio de 2020] Beam Shaping. Disponible en: <https://www.olympus-ims.com/en/ndt-tutorials/transducers/pa-definitions/>

4. METODOLOGÍA DE CONSTRUCCIÓN DE LA ONDA CONSTRUCTIVA

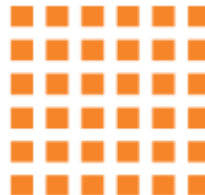
De acuerdo con el marco teórico de ensayos no destructivos mediante las técnicas del ultrasonido, se propone diseñar e implementar un modelo de laboratorio experimental, para generar una onda de ultrasonido constructiva con un determinado ángulo de incidencia al interior de una tubería de acero-carbono, a partir de la configuración de piezo-actuadores en modo *phased array*.

4.1 ESTUDIO DE LAS DIVERSAS CONFIGURACIONES DEL *PHASED ARRAY*

Es necesario recordar que los piezoeléctricos se organizan como una matriz para proporcionar más control del haz, en comparación del ultrasonido convencional. Razón por la que se decide analizar las diferentes configuraciones matriciales de los actuadores, para así implementar la más adecuada sobre la superficie de la tubería.

-Arreglo matricial

Figura 15. Arreglo matricial



Fuente: OLYMPUS. Phased Array Transducer Characteristics [figura]. [Consultado: 10 de octubre de 2020] Disponible en: <https://www.olympus-ims.com/en/ndt-tutorials/transducers/pa-definitions/>.

Ventajas: Capacidad de dirección en tres dimensiones, enfoque esférico o de un solo eje.

Desventajas: Diseño y proceso de fabricación complejos, requiere un gran número de pulsadores/receptores y una programación compleja.

-Arreglo anular segmentado

Figura 16. Arreglo anular segmentado



Fuente: OLYMPUS. Phased Array Transducer Characteristics [figura]. [Consultado: 10 de octubre de 2020] Disponible en: <https://www.olympus-ims.com/en/ndt-tutorials/transducers/pa-definitions/>.

Ventajas: haz elíptico o esférico con capacidad de dirección a diferentes profundidades y ángulos.

Desventajas: Diseño y proceso de fabricación complejos, requiere un gran número de pulsadores/receptores y una programación compleja.

-Arreglo lineal

Figura 17. Arreglo Lineal



Fuente: OLYMPUS. Phased Array Transducer Characteristics [figura]. [Consultado: 10 de octubre de 2020] Disponible en: <https://www.olympus-ims.com/en/ndt-tutorials/transducers/pa-definitions/>.

La mayoría de las aplicaciones usan ordenamientos lineales, porque son muy fáciles de programar y son relativamente más económicos que la mayoría de arreglos.

Ventajas: Se fabrican fácilmente y se montan en cuñas, se enfocan en un eje a diferentes profundidades y ángulos.

Desventajas: Requiere un gran tamaño para un enfoque profundo.

Por tanto, se observa que para los arreglos matriciales y anulares es necesario tener a disposición una gran cantidad de transductores eléctricos para su implementación, además la forma en que se encuentran organizados se requiere ubicarlos en una superficie plana y debido a las características de la tubería, no es viable implementar dichas configuraciones.

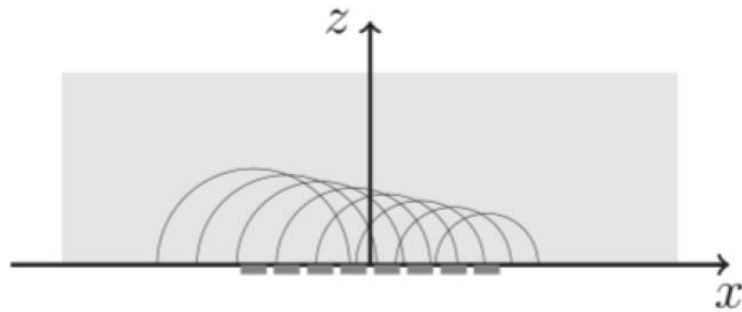
Asimismo, las configuraciones del *phased array*, por lo general se encuentran conformadas por 2^n elementos individuales, es por esto, que se realiza el montaje con 8 piezoeléctricos, teniendo en cuenta la cantidad limitada de elementos adquiridos (16). Y en vista de los factores mencionados, el arreglo lineal es la configuración más conveniente para la implementación del proyecto final.

4.2 SECUENCIA DE DISPARO DE LOS PIEZOELÉCTRICOS

Una vez se selecciona la configuración más adecuada de los piezo-actuadores, se procede a calcular la secuencia de disparo para dar forma al frente de onda, que estará direccionado a un determinado ángulo.

Por lo tanto, el tiempo de fase de cada elemento estará dado por la ecuación (3.7).

Figura 18. Forma del frente de onda con determinada orientación



Fuente: Gommlich, Andrea and Schubert Frank. Superposition of Elementary wave fronts with constructive interference in the focal point [figura]. On determination of focal laws for linear phased array probes as to the active and passive element size. 2016. P. 2.

Tabla 2. Tiempo de activación correspondiente a cada piezo-actuador, para $\theta = \frac{\pi}{6}$

Piezoeléctrico	Tiempo (μs)
0	0
1	6,66
2	13,33
3	20
4	26,66
5	33,33
6	40
7	46,66

Tabla 3. Tiempo de activación correspondiente a cada piezo-actuador, para $\theta = \frac{\pi}{4}$

Piezoeléctrico	Tiempo (μs)
0	0
1	9,428
2	18,856
3	28,284
4	37,712
5	47,14
6	56,569
7	65,997

Tabla 4. Tiempo de activación correspondiente a cada piezo-actuador, para $\theta = \frac{\pi}{3}$

Piezoeléctrico	Tiempo (μs)
0	0
1	11,54
2	23,09
3	34,64
4	46,18
5	57,73
6	69,28
7	80,82

Con el fin de obtener la forma del frente de onda anteriormente ilustrado, los piezo-actuadores se activan por medio de un código implementado en Arduino para controlar los tiempos de retardo del demultiplexor CD4051BE (ver anexo B).

4.3 CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA (FRECUENCIA DE RESONANCIA)

La frecuencia de resonancia de los piezoeléctricos está a función del material a la que se encuentran unidos, razón por la que se hace necesario, realizar un barrido de frecuencias de 10 [kHz] a 700 [kHz] en la lámina de acero-carbono.

Figura 19. Montaje para la caracterización del sistema

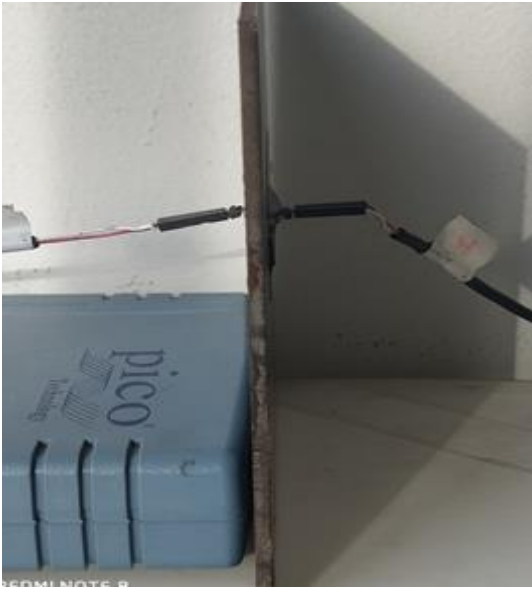
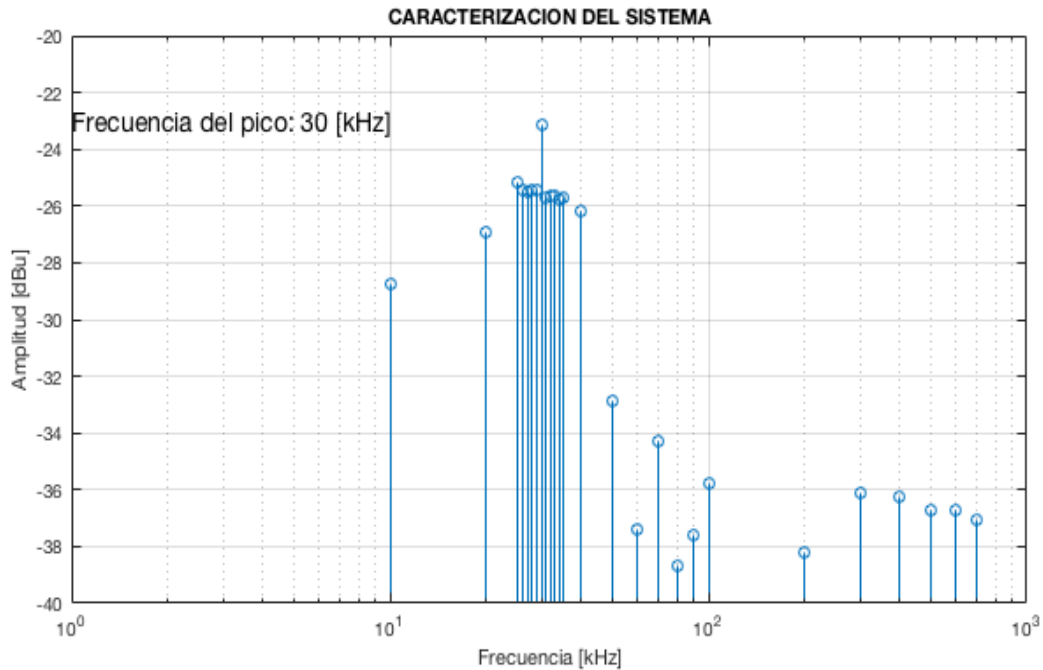


Tabla 5. Caracterización del sistema

Frecuencia [kHz]	Amplitud [dBu]	Frecuencia [KHz]	Amplitud [dBu]
10	-28,75	40	-26,2
20	-26,95	50	-32,9
25	-25,2	60	-37,37
26	-25,47	70	-34,29
27	-25,52	80	-38,7
28	-25,47	90	-37,61
29	-25.42	100	-35.79
30	-23.11	200	-38.22
31	-25.73	300	-36.12
32	-25.63	400	-36.25
33	-25.65	500	-36.7
34	-25.81	600	-36.7
35	-25.74	700	-37.06

Figura 20. Caracterización del sistema



En la tabla 5 y figura 20, se observa la amplitud en unidades de dBu, correspondiente al piezoeléctrico que se encuentra al otro lado de la lámina, sensando la señal transmitida a diferentes frecuencias. Consecuente a esta caracterización, se puede observar que la frecuencia de trabajo del sistema se encuentra alrededor de los 30 [kHz], debido a que la intensidad de la señal recibida en este rango de medida es mayor.

4.3.1 Diseño del filtro pasabanda de banda estrecha

Teniendo en cuenta la frecuencia de resonancia del sistema (30 kHz), y al ruido producido por el mismo, se procede a diseñar un filtro pasabanda de banda estrecha, con el fin de obtener medidas óptimas de la señal.

Los filtros de banda estrecha son aquellos que su banda de paso es inferior a 0.1 veces su frecuencia de corte.

Con el fin de mejorar la relación señal/ruido de la señal obtenida, se diseña un filtro pasabanda con banda estrecha en Matlab con frecuencias de corte $f_{c_1} = 29.9$ [kHz] y $f_{c_2} = 30.1$ [kHz]. Como se puede observar en las figuras 21 y 22, las señales que se encuentran fuera de la banda de paso son atenuadas.

Figura 21. Espectro de la señal original

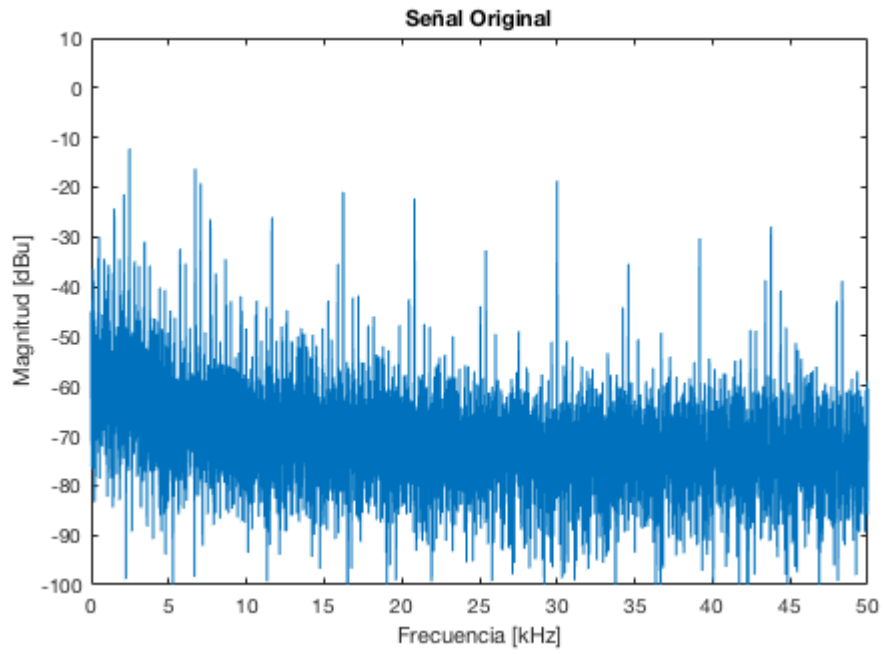
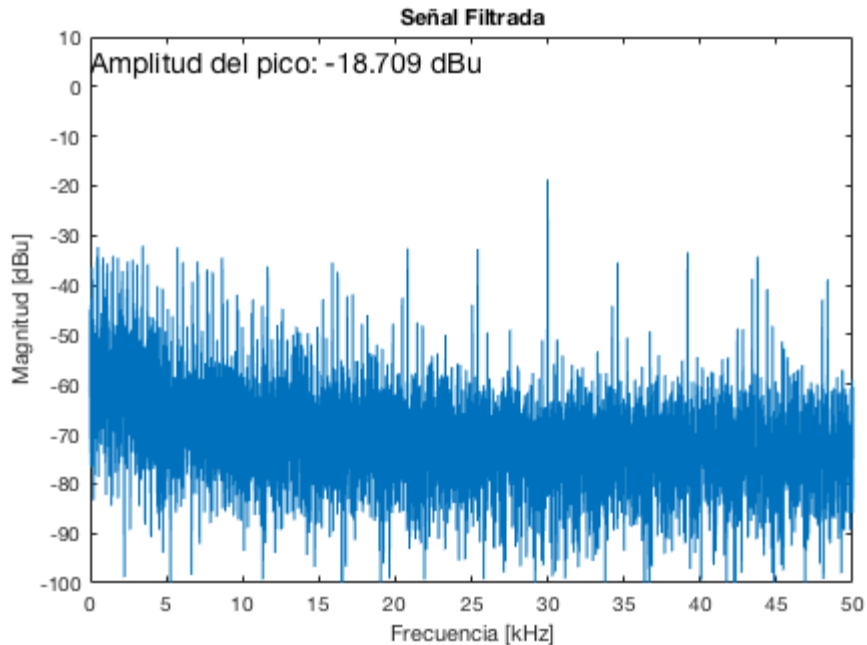


Figura 22. Espectro de la señal filtrada



4.4 PORCENTAJE DE ENERGÍA TRANSMITIDA Y REFLEJADA EN LAS INTERFACES ACÚSTICAS

Como se mencionó anteriormente, la impedancia acústica permite calcular el porcentaje de energía teórica transmitida y reflejada en las interfaces acústicas. Esto es importante, debido a que permite determinar de manera más cierta, el medio que se debería utilizar al interior de la tubería y lograr disminuir la diferencia de impedancias acústicas entre los medios y así gran parte de la energía pueda ser transmitida.

Por consiguiente, se procede a calcular la impedancia acústica (ecuación 3.2) y el porcentaje de la energía teórica reflejada y transmitida, quienes están dadas por las ecuaciones (3.3) y (3.4). Para el medio 1 (acero-carbono), medio 2 (Agua y Aire).

Tabla 6. Propiedades de los medios

	Medio: Acero-Carbono	Medio: Aire	Medio: Agua
Densidad [kg/m^3]	7850	1.293	997
Velocidad [m/s]	5920	343	1490

Tabla 7. Impedancia acústica de los medios

	Medio: Acero- Carbono	Medio: Aire	Medio: Agua
Impedancia acústica [$kg/m^2 * s$]	46472000	443449	1485530

Tabla 8. Interface acústica

	%Energía teórica transmitida	%Energía teórica reflejada
Interface acústica. Acero Carbono-Aire	1	99
Interface acústica. Acero Carbono-Agua	12,1	87,9

En la tabla 8, se puede observar el agua como el medio que mejor propiedades posee para la transmisión de la señal al interior de la tubería, y es por lo que se procede a realizar el siguiente montaje (ver figura 23), en donde se harán dos tomas de datos. La primera, el agua como medio al interior de la tubería y de manera consecuente el aire, con el propósito de verificar los valores calculados.

Figura 23. Montaje de ultrasonido convencional, para determinar el medio más adecuado al interior de la tubería de acero-carbono

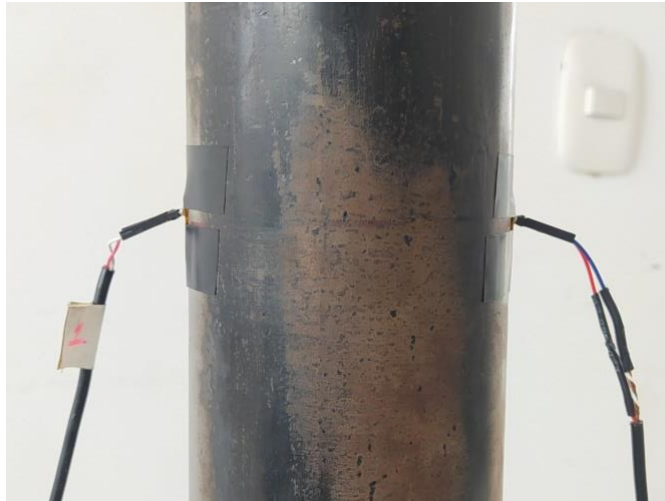


Figura 24. Espectro de la señal recibida, como Medio 1: Acero Carbono y Medio 2: agua

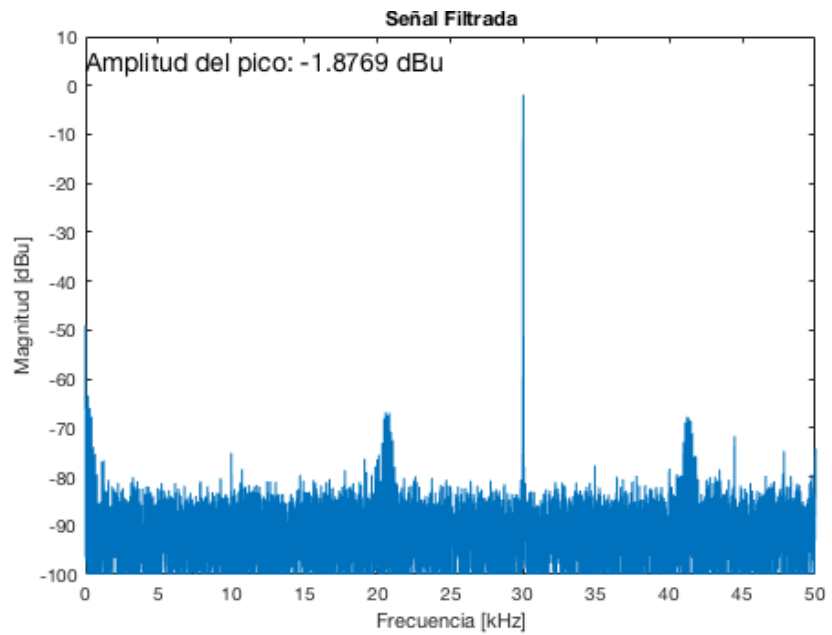


Tabla 9. Comparación de la señal reflejada y transmitida, con dos medios al interior de la tubería

Señal de entrada: 12 [V_{PP}] Frecuencia: 30 [KHz]		
	Sensor ubicado al lado opuesto de la tubería, con respecto al actuador	Sensor ubicado al interior de la tubería
	Recepción [dBu]	Recepción [dBu]
Con agua	-1,87	-10,53
Sin Agua	-9,99	-35,85

De acuerdo con la tabla 9, se puede observar que se tiene mayor transmisión de energía cuando el medio al interior de la tubería es el agua, debido a que con este, la diferencia de interfaces acústicas es menor en comparación a cuando se tiene como medio 2 al aire. Es por esto que se implementa el diseño final, con agua al interior de la tubería.

4.5 CARACTERIZACIÓN DE LOS PIEZOELÉCTRICOS

Debido a la gran diferencia que tienen algunos piezoeléctricos, con respecto a la capacidad de transmisión y recepción de la señal, se hace necesario caracterizar estos elementos con el montaje de la figura 23, con el objetivo de que los piezo-actuadores que conforman el arreglo, tengan aproximadamente la misma cantidad de energía para generar el frente de onda resultante.

Tabla 10. Caracterización de los piezoeléctricos

Amplitud de la señal de transmisión: 14.62 [dBu] Frecuencia de transmisión: 30 [KHz]	
Referencia Piezoeléctrico	Recepción [dBu]
080D	-13,92
078D	-24,03
086D	-20,43
093D	-18,59
S	-17,88
1	-17,66
2	-11,8
097D	-20,37
076D	-19,56
092D	-20,82

En la tabla 10, se puede observar las amplitudes de los diferentes actuadores en modo de ultrasonido convencional. De acuerdo con estos datos, los piezoeléctricos se pueden ubicar de la siguiente manera.

Tabla 11. Configuración *phased array*, según caracterización de los piezoeléctricos

Piezoeléctrico	Posición
092D	0
097D	1
076D	2
086D	3
093D	4
078D	5
S	6
1	7
2	Sensor

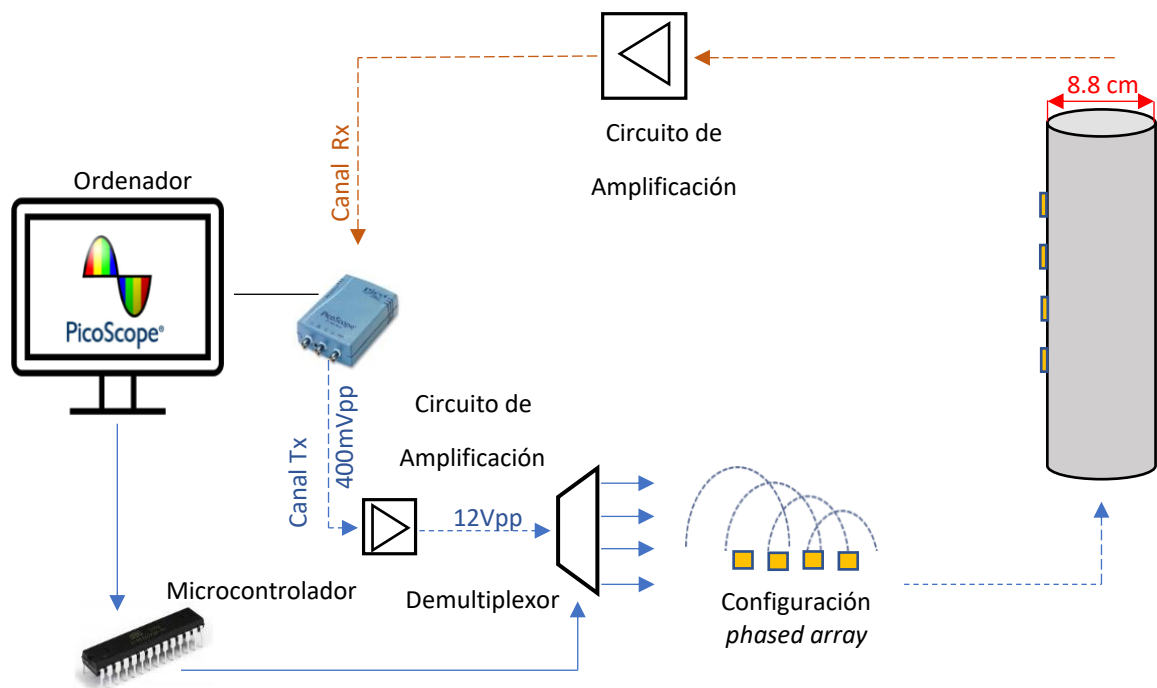
Mencionando además, que los elementos de mayor capacidad de energía recibida, se ubican de tal manera que su función, sea la de percibir la señal transmitida por los actuadores.

Así pues, una vez concluido los ensayos preliminares y ejecutada las modificaciones y análisis necesarios, se procede a diseñar la implementación final para la verificación del *phased array*.

5. DISEÑO EXPERIMENTAL

Se propone diseñar un modelo de laboratorio experimental, con el objetivo de lograr una onda acústica a una orientación determinada, utilizando las técnicas del ultrasonido. Dicho modelo está constituido por 8 elementos transductores, con una distancia de 2 [cm] de separación entre cada uno de ellos. Configurados en modo lineal, sobre la superficie de una tubería de acero-carbono, los cuales serán activados de modo que la forma de frente de onda resultante pueda inclinarse a un ángulo definido.

Figura 25. Diseño experimental



Luego de diseñar e implementar el modelo experimental, se realiza la toma de datos con diferentes ángulos de inclinación, configurando los piezo-actuadores de forma horizontal y vertical, para así determinar la orientación más adecuada y verificar el frente de onda del *phased array*.

Para ello, se propone el siguiente esquema.

Figura 26. Posiciones de los sensores, para verificar el ángulo de inclinación

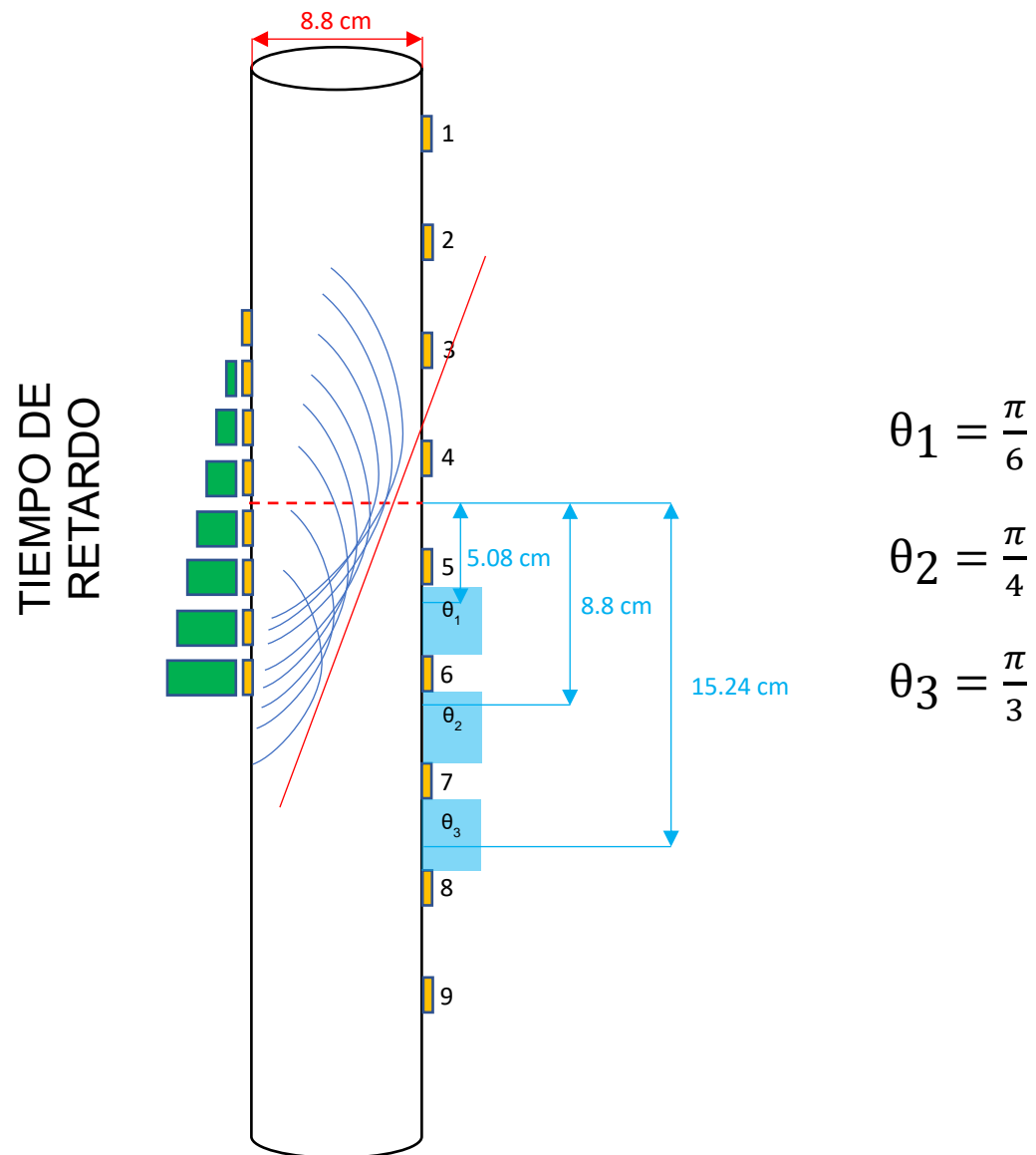


Tabla 12. Posiciones del sensor

Posición	Distancia respecto al inicio del arreglo
1	10 [cm]. Arriba
2	5 [cm]. Arriba
3	0
4	5 [cm]. Abajo
5	10 [cm]. Abajo
6	15 [cm]. Abajo
7	20 [cm]. Abajo
8	25 [cm]. Abajo
9	30 [cm]. Abajo

Se hace necesario recordar, que el ángulo con el que es direccionada la onda se referencia respecto a la apertura del *phased array*, el cual se aproxima a una sola fuente puntual, correspondiente al centro del arreglo (ver figura 26).

Por consiguiente, para verificar la inclinación del frente de onda, por ley de los senos, se calcula la distancia que existe entre la normal y la ubicación del sensor para diferentes ángulos de incidencia.

Tabla 13. Posición del sensor, respecto a la apertura del *phased array*

θ	Distancia respecto a la apertura del <i>phased array</i> [cm]
$\frac{\pi}{6}$	5,08
$\frac{\pi}{4}$	8,80
$\frac{\pi}{3}$	15,24

Una vez conocida las distancias del sensor respecto a la apertura del *phased array*, se hace necesario aclarar que la forma del frente de onda no tiene gran capacidad de dirección, debido al tamaño de los elementos que conforman el *phased array*, y en consecuencia a esto, el haz resultante se propaga en una región. Razón por la que los piezo-sensores no se ubican exactamente a la distancia hallada respecto a la apertura del arreglo, por lo tanto, se analizan las posiciones de medidas de la tabla 12.

Por consiguiente, teniendo en cuenta las distancias halladas en la tabla 13, de manera hipotética se puede decir que: La intensidad de la señal recibida para los diferentes ángulos, deberá ser mayor en las siguientes posiciones.

Tabla 14. Posiciones con mayor intensidad de señal percibida, para diferentes ángulos

θ	POSICIONES
$\frac{\pi}{6}$	5-6
$\frac{\pi}{4}$	6-7
$\frac{\pi}{3}$	7-8

6. RESULTADOS EXPERIMENTALES

6.1 UBICACIÓN VERTICAL

En la figura 27, se observa el montaje de los piezo-actuadores en forma vertical. Además, cabe recordar que una medida se debe repetir tres o cuatro veces para intentar neutralizar el error accidental.

Figura 27. Montaje de los piezo-actuadores ubicados de forma vertical.



Tabla 15. Media aritmética e imprecisión absoluta de las pruebas, para $\theta = \frac{\pi}{6}$

Posición	Prueba 1 [dBu]	Prueba 2 [dBu]	Prueba 3 [dBu]	Prueba 4 [dBu]	Media aritmética (\bar{X})	Imprecisión absoluta [dBu]
1	-17,84	-17,57	-16,68	-17,25	-17,34	0,370
2	-17,16	-17,38	-15,98	-16,83	-16,84	0,433
3	-17,09	-17,19	-17,85	-16,89	-17,26	0,300
4	-17,18	-17,25	-15,98	-16,84	-16,81	0,418
5	-16,95	-16,92	-16,91	-16,83	-16,90	0,038
6	-17,09	-16,88	-16,61	-16,74	-16,83	0,305
7	-17,3	-16,84	-16,84	-16,78	-16,94	0,180
8	-17,61	-16,90	-16,80	-16,80	-17,03	0,293
9	-18,00	-16,92	-16,67	-16,77	-17,09	0,455

Figura 28. Representación gráfica de la media aritmética, para $\theta = \frac{\pi}{6}$

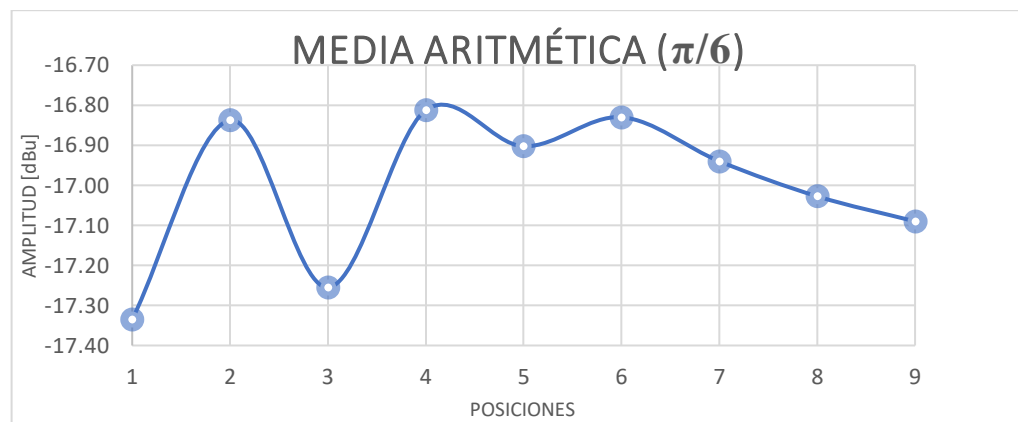


Tabla 16. Media aritmética e imprecisión absoluta de las pruebas, para $\theta = \frac{\pi}{4}$

Posición	Prueba 1 [dBu]	Prueba 2 [dBu]	Prueba 3 [dBu]	Prueba 4 [dBu]	Media aritmética (\bar{X})	Imprecisión absoluta [dBu]
1	-18,08	-20,97	-19,10	-20,31	-19,62	1,025
2	-17,74	-20,02	-19,19	-20,35	-19,33	0,860
3	-17,55	-19,86	-19,14	-19,80	-19,09	0,718
4	-17,62	-19,44	-19,00	-19,74	-18,95	0,665
5	-17,77	-19,34	-19,05	-19,61	-18,94	0,438
6	-17,30	-19,24	-18,77	-19,26	-18,64	0,672
7	-17,46	-19,26	-19,18	-19,40	-18,83	0,680
8	-17,39	-19,47	-19,21	-19,59	-18,92	0,760
9	-17,81	-19,87	-19,57	-19,68	-19,23	0,713

Figura 29. Representación gráfica de la media aritmética, para $\theta = \frac{\pi}{4}$

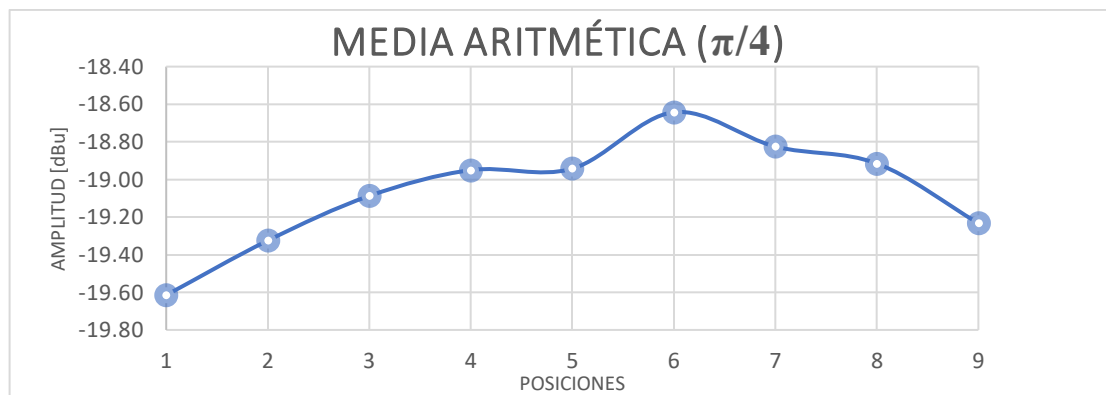
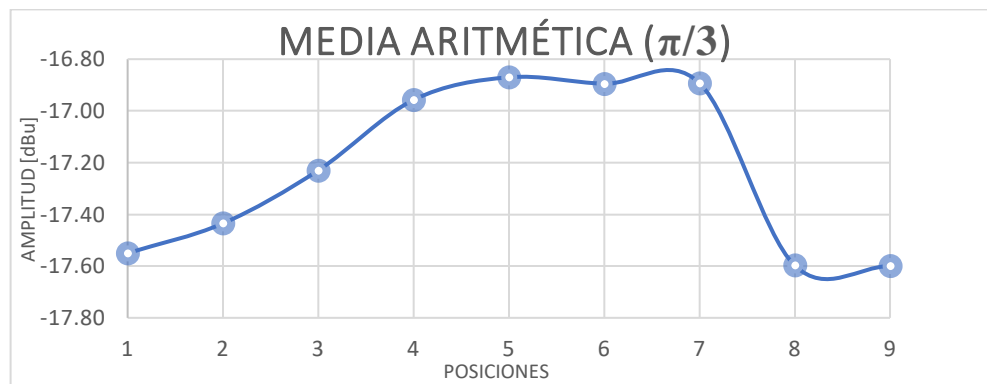


Tabla 17. Media aritmética e imprecisión absoluta de las pruebas, para $\theta = \frac{\pi}{3}$

Posición	Prueba 1 [dBu]	Prueba 2 [dBu]	Prueba 3 [dBu]	Prueba 4 [dBu]	Media aritmética (\bar{X})	Imprecisión absoluta [dBu]
1	-15,94	-18,00	-18,41	-17,85	-17,55	0,805
2	-15,95	-17,80	-17,76	-18,23	-17,44	0,740
3	-15,94	-17,23	-17,81	-17,94	-17,23	0,645
4	-15,65	-16,92	-17,40	-17,86	-16,96	0,672
5	-16,03	-16,79	-17,47	-17,19	-16,87	0,460
6	-15,85	-16,78	-17,40	-17,55	-16,90	0,580
7	-15,84	-17,20	-17,32	-17,21	-16,89	0,528
8	-15,24	-19,30	-18,41	-17,44	-17,60	1,258
9	-15,30	-19,22	-17,87	-18,01	-17,60	1,150

Figura 30. Representación gráfica de la media aritmética, para $\theta = \frac{\pi}{3}$



En las figuras 28, 29 y 30 se representa la media aritmética de las pruebas realizadas para los diferentes ángulos, con los piezoeléctricos ubicados de forma vertical.

Los datos obtenidos en las tablas 15, 16 y 17, no fueron los esperados, debido a que no era posible tener un buen acople entre la superficie de la tubería y el piezoeléctrico, ocasionando de esta manera atenuación de la señal en ciertas posiciones. Por esto, se decide modificar la orientación de los piezoeléctricos y ubicarlos de forma horizontal.

6.2 UBICACIÓN HORIZONTAL

En la figura 31, es posible visualizar el montaje de los piezo-actuadores orientados en forma horizontal, y de la misma manera en el Anexo D, se observan los resultados de la señal recibida por el sensor ubicado a diferentes posiciones sobre la superficie opuesta de la tubería, respecto con los elementos del arreglo.

Figura 31. Montaje de los piezo-actuadores ubicados de forma vertical.

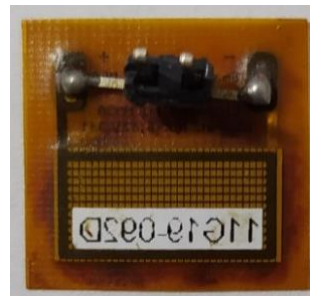


Tabla 18. Media aritmética e imprecisión absoluta de las pruebas, para $\theta = \frac{\pi}{6}$

Posición	Prueba 1 [dBu]	Prueba 2 [dBu]	Prueba 3 [dBu]	Prueba 4 [dBu]	Media aritmética (\bar{X})	Imprecisión absoluta [dBu]
1	-16,15	-16,56	-16,04	-16,05	-16,20	0,250
2	-16,14	-16,48	-16,06	-16,01	-16,17	0,153
3	-16,00	-16,37	-15,90	-15,93	-16,05	0,585
4	-15,98	-15,88	-15,92	-14,88	-15,67	0,390
5	-15,66	-15,69	-15,34	-14,54	-15,31	0,383
6	-15,73	-15,87	-15,10	-14,27	-15,24	0,558
7	-16,04	-16,42	-15,93	-15,13	-15,88	0,375
8	-16,17	-16,22	-16,19	-16,37	-16,24	0,067
9	-16,95	-16,38	-16,96	-16,60	-16,72	0,233

Figura 32. Representación gráfica de la media aritmética, para $\theta = \frac{\pi}{6}$

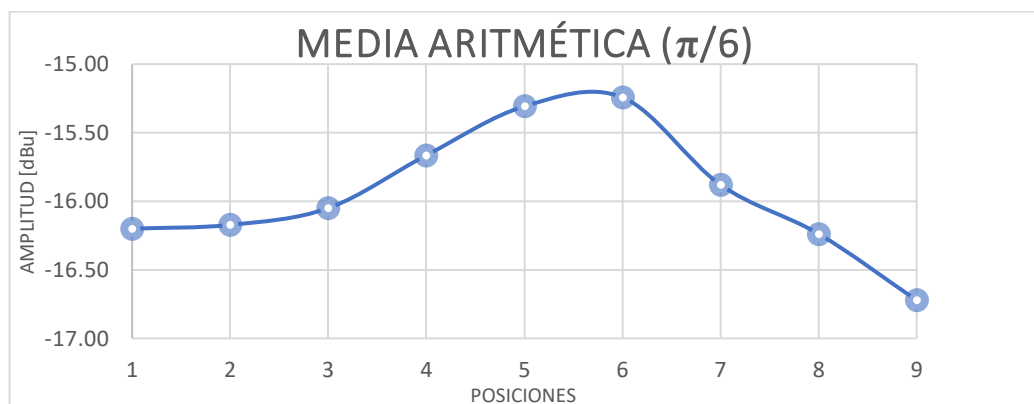


Tabla 19. Media aritmética e imprecisión absoluta de las pruebas, para $\theta = \frac{\pi}{4}$

Posición	Prueba 1 [dBu]	Prueba 2 [dBu]	Prueba 3 [dBu]	Prueba 4 [dBu]	Media aritmética (\bar{X})	Imprecisión absoluta [dBu]
1	-17,28	-18,75	-18,56	-17,18	-17,94	0,712
2	-17,49	-17,04	-17,67	-18,17	-17,59	0,328
3	-17,21	-17,24	-17,57	-17,09	-17,28	0,148
4	-17,36	-17,08	-17,25	-17,06	-17,19	0,118
5	-17,27	-17,10	-17,20	-17,06	-17,16	0,077
6	-17,16	-16,98	-17,16	-16,85	-17,04	0,123
7	-17,17	-16,96	-17,61	-17,02	-17,19	0,210
8	-18,31	-16,95	-17,44	-17,18	-17,47	0,420
9	-17,65	-17,15	-17,61	-18,00	-17,60	0,227

Figura 33. Representación gráfica de la media aritmética, para $\theta = \frac{\pi}{4}$

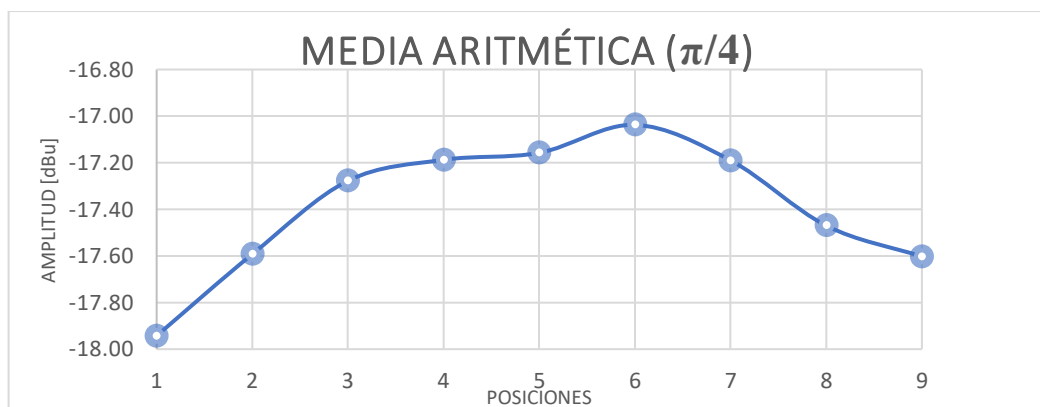
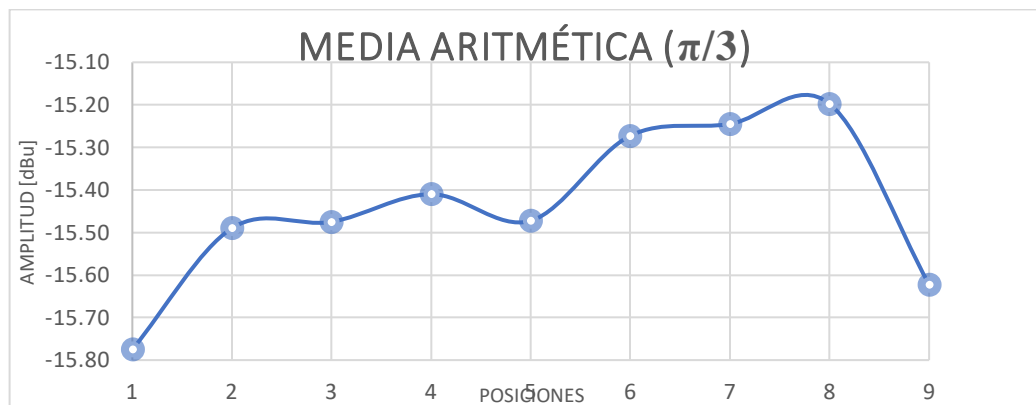


Tabla 20. Media aritmética e imprecisión absoluta de las pruebas, para $\theta = \frac{\pi}{3}$

Posición	Prueba 1 [dBu]	Prueba 2 [dBu]	Prueba 3 [dBu]	Prueba 4 [dBu]	Media aritmética (\bar{X})	Imprecisión absoluta [dBu]
1	-16,50	-14,82	-16,37	-15,41	-15,78	0,660
2	-16,21	-14,90	-15,90	-14,95	-15,49	0,565
3	-16,20	-15,10	-15,64	-14,96	-15,48	0,445
4	-16,37	-14,98	-15,22	-15,07	-15,41	0,480
5	-16,30	-15,67	-14,92	-15,00	-15,47	0,518
6	-16,24	-14,95	-14,92	-14,98	-15,27	0,482
7	-16,14	-14,83	-14,90	-15,11	-15,25	0,450
8	-16,08	-15,04	-14,93	-14,74	-15,20	0,360
9	-16,56	-15,11	-15,49	-15,33	-15,62	0,640

Figura 34. Representación gráfica de la media aritmética, para $\theta = \frac{\pi}{3}$



Una vez analizado el arreglo en forma horizontal, y de acuerdo con los datos obtenidos en las tablas 18, 19 y 20, es posible corroborar la hipótesis planteada anteriormente. Donde se mencionaba que la mayor intensidad de la señal recibida estaría contenida en las posiciones 5-6 correspondiente a $\theta = \frac{\pi}{6}$, 6-7 a $\theta = \frac{\pi}{4}$ y 7-8 para $\theta = \frac{\pi}{3}$. Por consiguiente, es posible decir que: la manera más adecuada de ubicar el *phased array* es en forma horizontal.

Además de ello, se observa que para las diferentes medidas se obtiene cierta cantidad de imprecisión, esto es debido al modo en que se acoplan los elementos sobre la superficie del material, y de igual forma a la capacidad de energía recibida por el piezo-sensor.

6. CONCLUSIONES

- Para mejorar la transmisión de la señal, se requiere realizar una adaptación de impedancias, ya que una fina capa de aire entre los piezo-actuadores y la superficie de la tubería de acero-carbono, puede causar una importante atenuación de la señal transmitida. Debido a esto, se hace necesario aplicar un gel sobre la superficie del material, con el fin de reducir la diferencia de impedancias acústicas.
- Se determina que la configuración más adecuada en modo *phased array* es la lineal, debido a la forma circular de la superficie del material; descartando así un arreglo matricial o anular. Teniendo en cuenta que la cantidad de piezoeléctricos necesarios para el montaje debe ser de 2^n .
- Dentro del análisis expuesto, se determina que para la configuración *phased array* con los piezoeléctricos M0714P2, se hace necesario orientar los elementos del arreglo de forma horizontal. Debido a que cuando eran ubicados de forma vertical los datos obtenidos no fueron los esperados, por lo tanto, no es factible tener un acople compacto entre la superficie de la tubería y el piezo-eléctrico.
- Se determina la secuencia de disparo del arreglo vectorial, para formar los frentes de ondas direccionados, correspondientes a los ángulos de $\theta = \frac{\pi}{6}$, $\theta = \frac{\pi}{4}$, y $\theta = \frac{\pi}{3}$.
- Se observa que al direccionar la onda con un ángulo de $\theta = \frac{\pi}{6}$, la mayor intensidad de la señal recibida se encuentra contenida en las posiciones 5-6. Con un ángulo de $\theta = \frac{\pi}{4}$, entre las posiciones 6 y 7; y para $\theta = \frac{\pi}{3}$, entre las

posiciones 7 y 8. Verificando así la hipótesis planteada, cumpliendo de esta manera el objetivo propuesto.

- La precisión de las medidas al realizar diferentes tomas de datos está directamente afectada por el acople de los elementos sobre la tubería, debido a que para cada toma de datos es necesario realizar el montaje. Además, la formación del frente de onda se ve afectado por la variación de la transmisión de cada uno de los piezoeléctricos.

7. RECOMENDACIONES

- Con el objetivo de reducir el porcentaje de la señal reflejada causada por la impedancia acústica del material, se hace conveniente aumentar la frecuencia de trabajo del sistema, debido a que este es un factor importante en la transmisión de energía sobre materiales de alta densidad. Además, es necesario mencionar que la caracterización de frecuencia del sistema se vio afectada por las limitaciones del LF353. Debido a esto, se recomienda utilizar un amplificador con mayor ancho de banda de ganancia, para así aumentar la frecuencia de señal de transmisión.
- El control de la señal de activación de los piezoeléctricos se realizó con la placa Atmega 328p, la cual posee una velocidad de reloj de 16MHz, Debido a que soporta el tiempo de retardo de activación entre los piezoeléctricos necesario para las pruebas realizadas. Se recomienda utilizar una tarjeta desarrollo, que permita realizar toma de datos con tiempo de retardo inferiores a 4 μ s.

BIBLIOGRAFÍA

ARIAS CABEZA, Leidy Lorena. Estimación del Flujo Volumétrico de Cortes y Derrumbes de Perforación, Usando Técnicas de Ultrasonido. Propuesta de trabajo de investigación de Maestría. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Escuela de ingenierías eléctrica, electrónica y de telecomunicaciones, 2019. 45p.

CAEZ ORTIZ, Jesus y RUEDA BAUTISTA, Jeiver. Metodología Para La Inspección Y Detección De Fallas En Placas Grandes De Acero (Acero 1020 Y Acero Inoxidable Serie 300 Aisi), Mediante El Uso De La Técnica De Ultrasonido Phased Array. Proyecto de grado para optar el título de ingeniero mecánico. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingeniería físico-mecánicas, 2019. 108 p.

GOMMLICH, Andreas y SCHUBERT, Frank. On Determination of Focal Laws for Linear Phased Array Probes as to the Active and Passive Element Size. 19th World Conference on Non-Destructive Testing 2016.

HUETE FUERTES, Ricardo *et al.* TEORÍA Y TÉCNICAS DE LA EDIFICACIÓN: Aplicación De Los Métodos de Ultrasonidos a la Verificación De Materiales de Construcción. Revista de Edificación RE. N° 13. marzo 1993.

INGENIEROS ESPECIALISTAS. Ultrasonido Phased Array - PAUT. [Sitio Web]. Pablo Emilio Guzmán Plazas. 1 de noviembre de 2018. [Consultado el 22 de septiembre de 2020]. Disponible en:

<http://www.ingenierosespecialistas.com/2018/11/ultrasonic-phased-array-paut.html>.

Lloyd, J. M. (2004). Electrical Properties of Macro-Fiber Composite Actuators and Sensors. Virginia State University.

LOAIZA RAMÍREZ, Manuel. MODELADO Y SIMULACIÓN DE LA PROPAGACIÓN DE ONDAS ELÁSTICAS EN MEDIOS HETEROGÉNEOS CON MÉTODOS ESPECTRALES DE CHEBYSHEV. Tesis que para optar el grado de: MAESTRO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA PROCESAMIENTO DIGITAL DE SEÑALES. México. Universidad Nacional Autónoma de México, 2011. 79p.

Malmcrona, Arturo Martín. “APLICACIONES DEL EFECTO PIEZOELÉCTRICO PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA”. Trabajo de fin de grado para otorgar la ingeniería en Tecnologías Industriales. Leganés. Universidad Carlos III de Madrid, 2018. 115p.

MARTÍNEZ RODRÍGUEZ, Jairo Alejandro *et al.* Fundamentos teórico-prácticos del ultrasonido. En: Tecnura: Tecnología y Cultura afirmando el conocimiento [en línea]. Bogotá, Colombia: Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2007, vol. 10, nro. 20, pp.4-18. [Consultado: 22 de septiembre de 2020]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=257021012001>. ISSN: 0123-921X.

Pico Technology Ltd. (2013). PicoScope ® 2000 Series. Retrieved from www.picotech.com.

Pico Technology Ltd. (2016). Software del osciloscopio para PC, Guía del usuario.

RAMIREZ, Silva *et al.* Estimation of Caving volumetric-flow using the ultrasonic Doppler method. En: *CT& F ciencia, tecnología y futuro*. 2018, vol. 8, nro. 1. pp. 61-66. DOI: <https://doi.org/10.29047/01225383.92>.

RIMOLDI, Claudio y MUNDO, Luis Mariano. 2012. Cátedra: Ensayos no destructivos. Apunte de clase. Ensayo no destructivo por método de ultrasonido. [En línea]. (Recuperado el 1 de julio de 2018). Disponible en: <https://www.ing.unlp.edu.ar/catedras/A0006/>.

Smart Material Corp. (2017). *MACRO FIBER COMPOSITE-MFC*. Retrieved from www.smart-material.com.

Texas Instruments. (2013). LF353-N Wide Bandwidth Dual JFET Input Operational Amplifier. Retrieved from www.ti.com.

Texas Instruments. (2017). CD405xB CMOS Single 8-Channel Analog Multiplexer/Demultiplexer with Logic-Level Conversion. Retrieved from www.ti.com.

ANEXOS

ANEXO A. INSTRUMENTACIÓN

- **PicoScope 2208**

Para la medición de la onda generada por los actuadores, y captada por el piezoeléctrico receptor, se dispondrá de un osciloscopio portable. El PICOSCOPE 2208 brinda las herramientas necesarias para lograr el objetivo del proyecto, ya que este dispositivo permite medir la señal de interés, esta puede ser observada desde un ordenador mediante un software libre llamado PicoScope®6 y además es compatible con Matlab® permitiendo que se pueda hacer cálculos matemáticos con la señal recibida por el cristal piezoeléctrico receptor.

Figura 1. PicoScope 2208



Fuente: Pico Technology. 2013. PicoScope® 2000 Series. p 1.

Tabla 1. Especificaciones principales del PicoScope 2208

Ancho de banda	200 MHz
Tasa de muestreo	1 GS/s
Memoria	40 kS
Número de canales	2
Resolución	8 bits

Fuente: PicoScope Serie 2000 [en línea]. Picotech. [Consultado: 8 de octubre de 2020]. Disponible en: <https://www.picotech.com/download/datasheets/PicoScope2200-es.pdf>

El PicoScope 2208 se tiene a disposición en el laboratorio del grupo de investigación CEMOS en el Parque Tecnológico Guatiguará – UIS.

- **Piezoeléctricos flexibles**

Para generar la onda direccionada, es necesaria la utilización de piezoeléctricos flexibles, para poder obtener un buen contacto entre la superficie del cristal piezoeléctrico y la tubería. Para ello se va a usar Macro Fiber Composite (MFC), que es un actuador y sensor de alto rendimiento, durabilidad y flexibilidad, inventado y desarrollado por la NASA en 1996.

El MFC consiste en varillas de cristales piezoeléctricos rectangulares intercalados entre capas, creando una película delgada adaptable a la superficie. Si se aplica

voltaje al MFC este se distorsionará y generará vibraciones; y si no se aplica voltaje se convierte en un medidor de tensión altamente sensible ante deformaciones, ruidos o vibraciones.

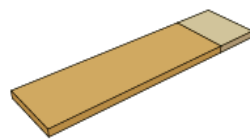
Se cuenta con 16 piezoeléctricos MFC M0714 – P2 en el laboratorio del grupo de investigación CEMOS en el Parque Tecnológico Guatiguará – UIS.

Figura 2. Sensor piezoeléctrico sensible MFC M0714 - P2

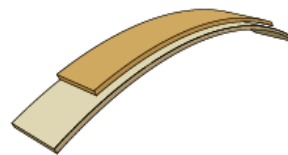


Figura 3. Propiedades del MFC

MFC Work Modes



Expansion



Bending



Torsion

Fuente: Smart Material Corp. 2017. Macro fiber composite – MFC. p 2.

Las características principales de los transductores M0714 P2 se encuentran resumidas en la tabla 2.

Tabla 2. Características MFC M0714 P2

Max voltaje operacional	+ 360 V
Min voltaje operacional	- 60 V
Max temperatura de operación	176° F
Ancho de banda como actuador	10 Hz a 750 kHz
Área activa	7 mm × 14 mm

Fuente: MFC P2 and P3 types (d31 effect), Contractor [en línea]. Smart Material Corp. [Consultado: 8 de octubre de 2020]. Disponible en: <https://www.smart-material.com/MFC-product-P2.html>

- **Amplificador LF353**

Este dispositivo es un Op-Amp de bajo costo, de alta velocidad, con entradas JFET, con compensación de tensión de entrada muy baja. Eso requiere una corriente de alimentación baja, pero mantiene un producto de gran ganancia y ancho de banda a una velocidad de respuesta rápida. La salida está protegida contra cortocircuitos debido a la impedancia de salida resistiva de 200Ω.

Tabla 3. Características del amplificador LF353

Número de amplificadores	2
Voltaje de alimentación	$\pm 18 \text{ V}$
Ancho de banda típico	4 MHz
Slew rate	13 V/ μs
Impedancia de entrada	$10^{12} \Omega$
Voltaje offset de entrada	50mV

Fuente: Amplificador Operacional LF353 [en línea]. Bigtronica. [Consultado: 8 de octubre de 2020]. Disponible en: <https://www.bigtronica.com/centro/semiconductores/circuitos-integrados/amplificador-operacional/1694-amplificador-operacional-lf353-5053212016944.html>

- **Multiplexor / Demultiplexor CD4051BE**

El multiplexor analógico CD4051BE es un interruptor analógico controlado digitalmente con baja impedancia en estado encendido y muy baja corriente de fuga en estado apagado. El control de señales analógicas hasta 20VP-P se puede lograr por amplitudes de señal digital de 4,5 V a 20 V. El CD4051BE tiene tres entradas binarias de control, A, B, y C, y una entrada de inhibición. Las tres señales binarias permiten seleccionar 1 de 8 canales para estar encendidos y se conectan a la entrada o salida común dependiendo el modo de uso (multiplexor o demultiplexor).

Para la activación de los piezoeléctricos, se utiliza el CD4051BE en forma de demultiplexor.

Tabla 4. Características CD4051BE

Tipo	CMOS
Configuración del multiplexor	8 a 1
Voltaje	3 Vpp a 20Vpp
Rango de temperatura de funcionamiento	-55°C a +125°C
Encapsulado	DIP de 16 pines

Fuente: CD4051 CMOS Multiplexer/Demultiplexer [en línea]. Carrod electronica. [Consultado: 8 de octubre de 2020]. Disponible en: <https://www.carrod.mx/products/cmos-multiplexer-demultiplexer-cd4051>

- **Arduino UNO**

El Arduino UNO es una placa de microcontrolador de código abierto basado en el microchip ATmega328P y desarrollado por Arduino.cc. La placa está equipada con conjuntos de pines de E/S digitales y analógicas que pueden conectarse a varias placas de expansión y otros circuitos.

Tabla 5. Características Arduino UNO

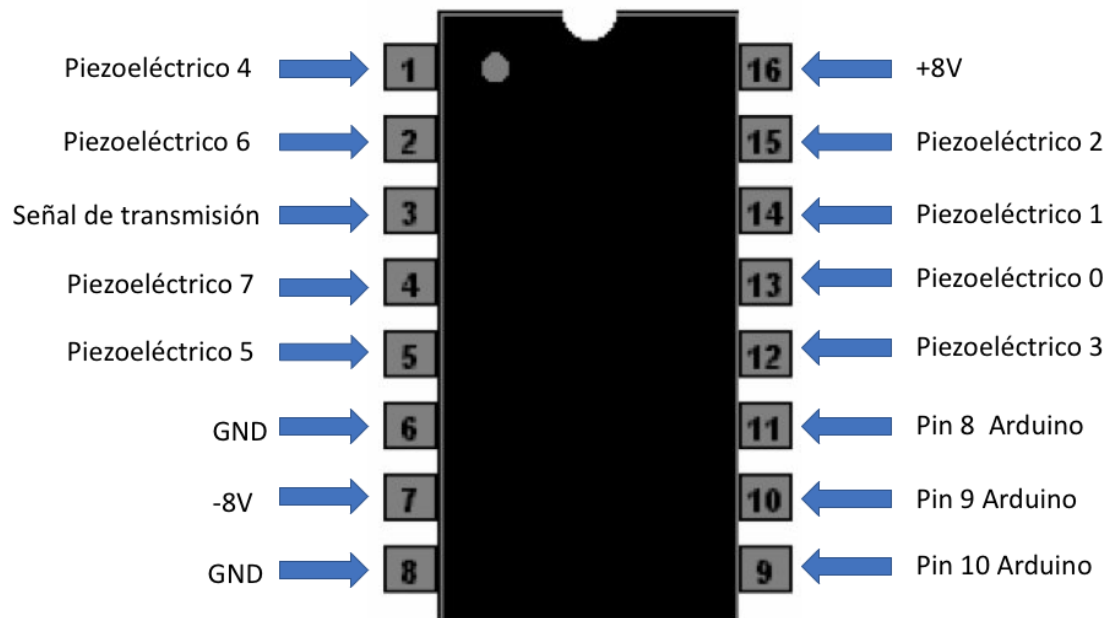
Microcontrolador	Microchip ATmega328P
Voltaje de funcionamiento	5V
Voltaje de entrada	7V a 20V
Pines de E/S digitales	14 (de los cuales 6 proporcionan salida PWM)
Pines de entrada analógica	6 pines
Velocidad del reloj	16MHz
Corriente DC por Pin de E/S	20mA
Corriente CC para Pin de 3.3V	50mA
Memoria Flash	32KB de los cuales 0.5KB son utilizados por el gestor de arranque
SRAM	2KB

Fuente: Arduino Uno, partes, componentes, para qué sirve y dónde comprar. [en línea]. Descubre Arduino. [Consultado: 8 de octubre de 2020]. Disponible en: <https://descubrearduino.com/arduino-uno/>

ANEXO B. CONEXIÓN ENTRE EL MULTIPLEXOR/DEMULTIPLEXOR CD4051BE Y ARDUINO UNO

En el programa IDE de Arduino, se aplica la ley focal, para generar un frente de onda direccionado con una determinada orientación, una vez realizado el cálculo, se programa el encendido de los piezo-actuadores con dicho tiempo de retardo, esto se logra gracias a los pines de selector que posee el multiplexor CD4051BE, los cuales se conectan a los pines de salida digitales del Arduino UNO (Figura 4).

Figura 4. Conexión entre CD4051BE y Arduino UNO



ANEXO C. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS REALIZADAS

A Continuación, se muestra la señal recibida, al transmitir con un ángulo de $\theta = \frac{\pi}{6}$ y los piezoeléctricos orientados de forma horizontal. El sensor se ubica en diferentes posiciones de la tubería (Tabla 12).

Figura 7. Resultados de la señal recibida, sensor en la posición 1

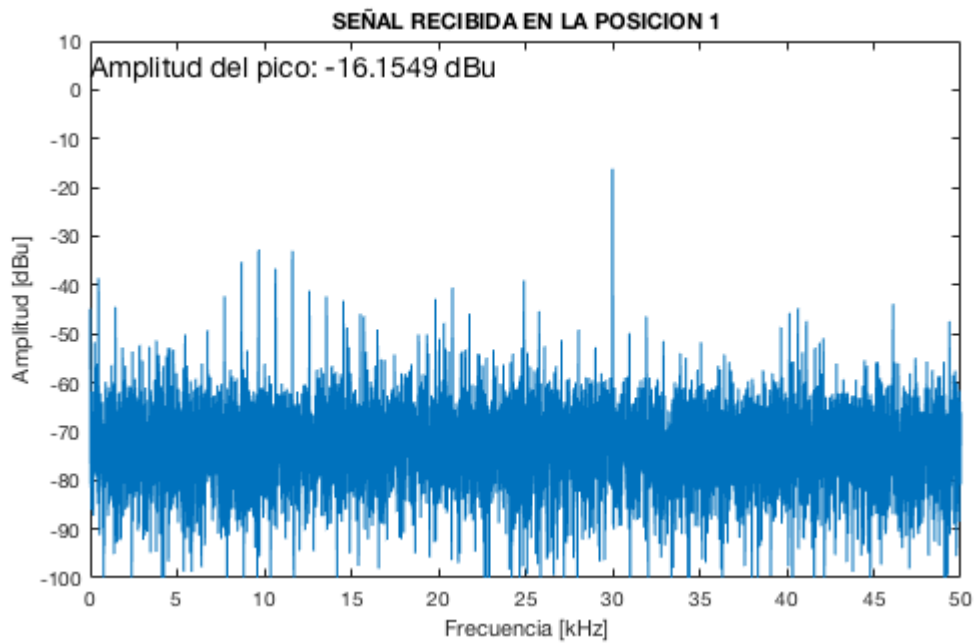


Figura 8. Resultados de la señal recibida, sensor en la posición 2

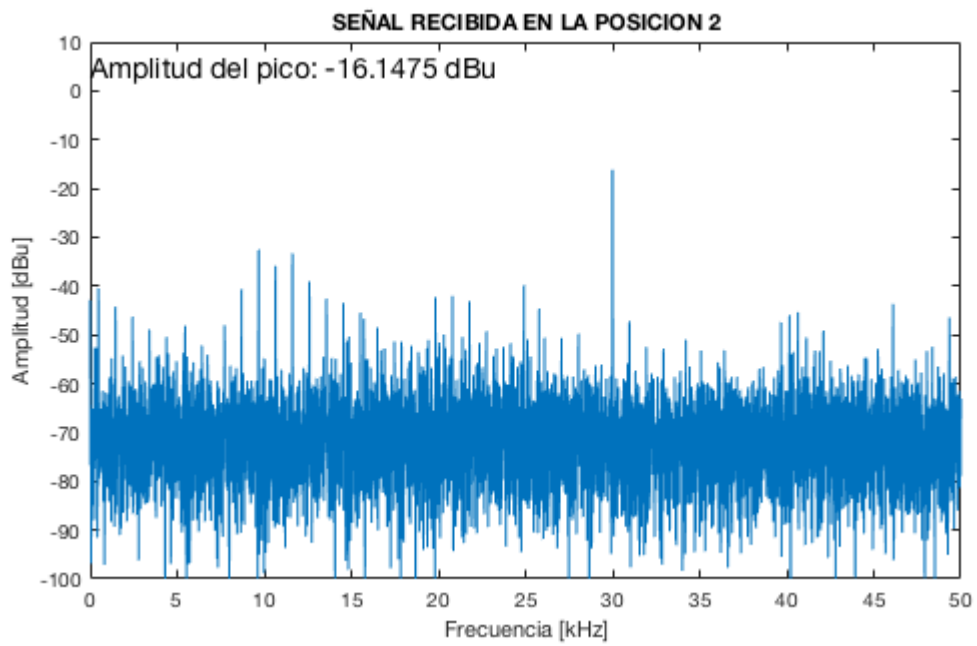


Figura 9. Resultados de la señal recibida, sensor en la posición 3

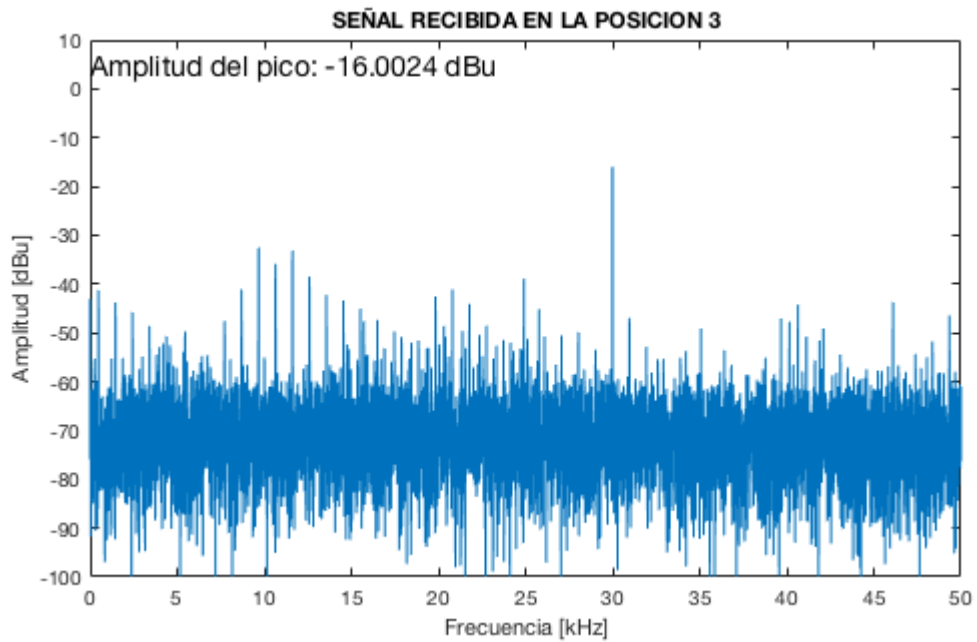


Figura 10. Resultados de la señal recibida, sensor en la posición 4

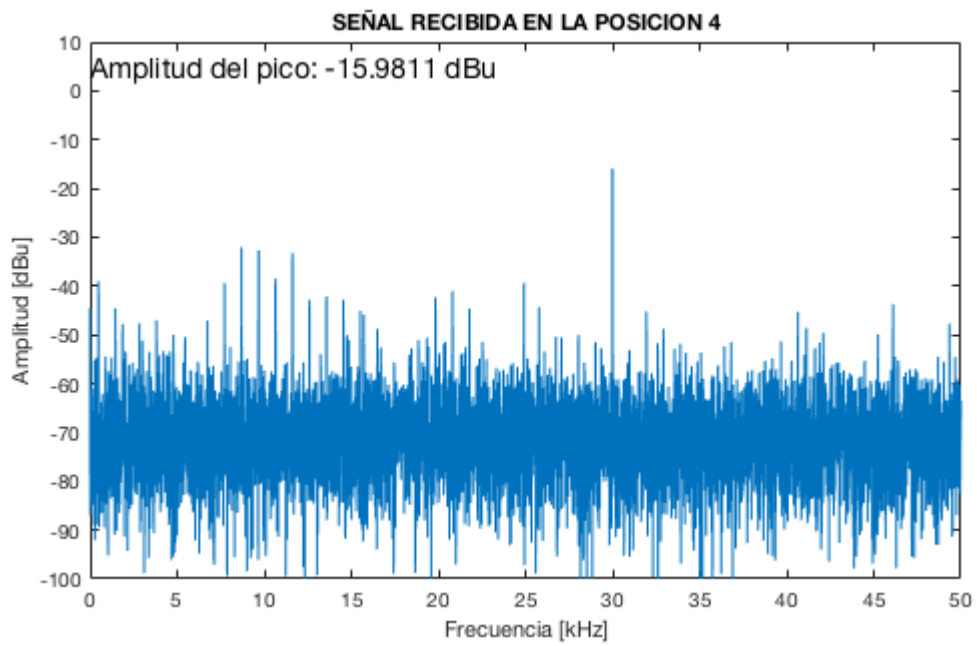


Figura 11. Resultados de la señal recibida, sensor en la posición 5

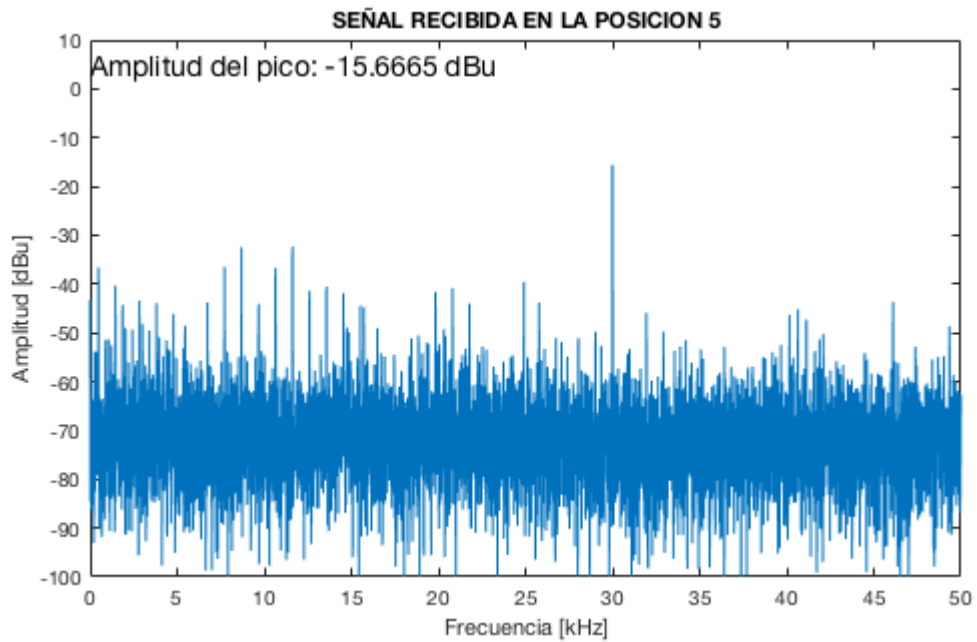


Figura 12. Resultados de la señal recibida, sensor en la posición 6

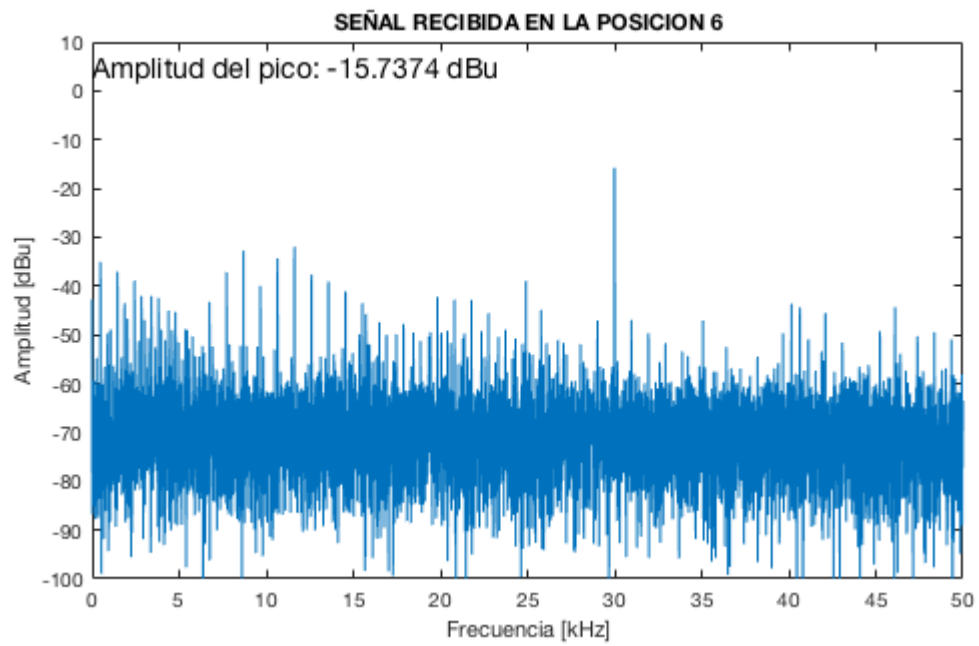


Figura 13. Resultados de la señal recibida, sensor en la posición 7

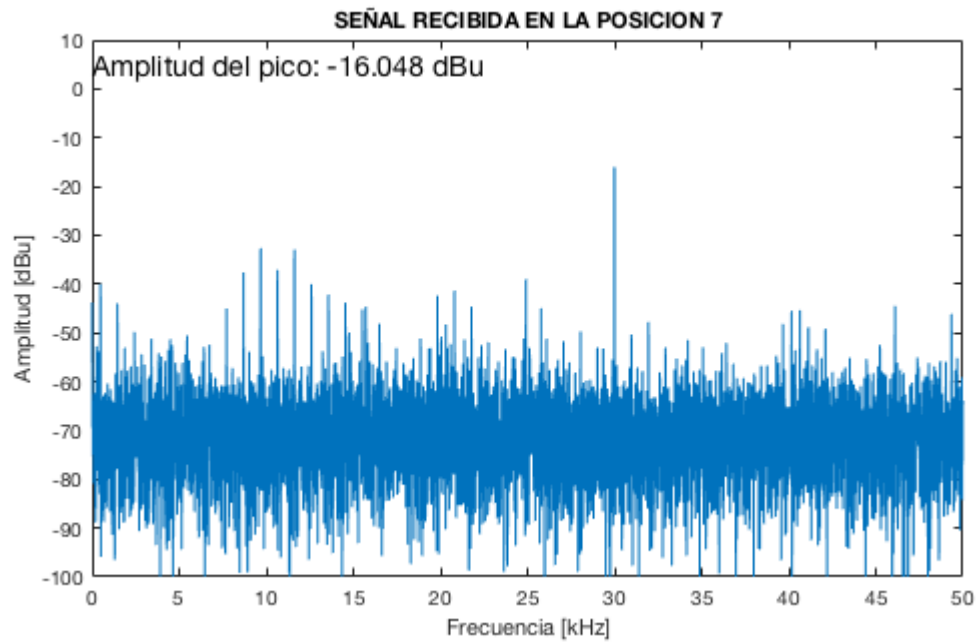


Figura 14. Resultados de la señal recibida, sensor en la posición 8

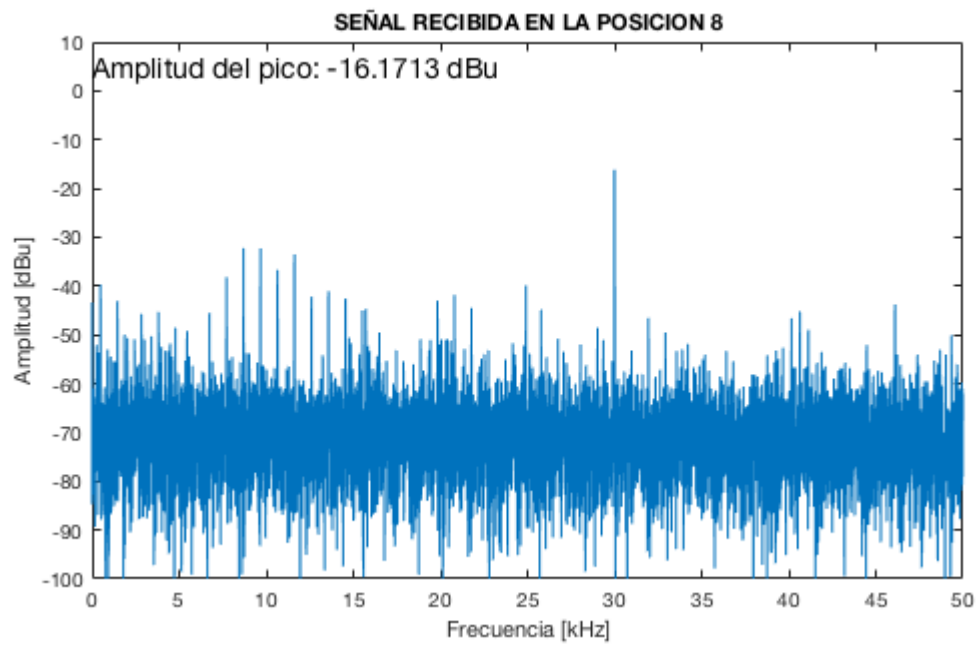


Figura 15. Resultados de la señal recibida, sensor en la posición 9

