

**CARACTERIZACIÓN DE TUBERÍAS POR ULTRASONIDO ORIENTADA A
SISTEMAS DE INSPECCIÓN MÓVIL**

JUAN MANUEL SALAZAR RODRÍGUEZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA, ELECTRONICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BUCARAMANGA
2012**

**CARACTERIZACIÓN DE TUBERÍAS POR ULTRASONIDO ORIENTADA A
SISTEMAS DE INSPECCIÓN MÓVIL**

JUAN MANUEL SALAZAR RODRÍGUEZ

**Trabajo de Grado para optar al título de
Maestría en Ingeniería Electrónica**

**Director
OSCAR GUALDRÓN GONZÁLEZ
Vicerrector de Investigación y Extensión**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA, ELECTRONICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BUCARAMANGA
2012**

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	14
2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	15
3. SELECCIÓN DEL PIEZOELECTRICO DE ULTRASONIDO	17
3.1. Sensibilidad en función de la frecuencia de resonancia	17
3.2. Campo cercano y ángulo de dispersión	18
3.3. Punto focal en el material de ensayo en el agua.	21
3.4. Atenuación.	22
3.5. Potencia del piezoelectrico	24
3.6. Sensibilidad del piezoelectrico	24
4. SIMULACIÓN DEL SISTEMA	25
4.1. Simulación del piezoelectrico mediante un ' <i>phased array</i> '	25
4.2. Parámetros de la simulación	28
4.3. Características del primer eco	30
4.4. Características del segundo eco	30
4.5. Sistema con solo un piezoelectrico	31
4.6. Sistema con un arreglo de 20 piezoelectricos	33
4.7. Sistema con un arreglo de 20 piezoelectricos con foco	36
4.7.1. Arreglo de 20 piezoelectricos con foco en ($l_f=4\text{cm}$ y $\theta = 90^\circ$)	37
4.7.2. Arreglo de 20 piezoelectricos con foco en ($l_f=2\text{cm}$ y $\theta = 90^\circ$)	39
4.8. Comparación de la atenuación de los arreglos	41
5. EXTRACCIÓN DE RUIDO	42
5.1. Transformada wavelet.	42
5.2. Extracción de ruido de la señal simulada.	46
6. CARACTERIZACIÓN DE LOS ECOS	49
7. CLASIFICACIÓN DE LOS ECOS	53
7.1. Análisis de componentes principales	59
7.2. Lógica difusa	63
7.2.1. Sistemas de Inferencia Difusos	64
8. GENERACIÓN PERFIL DE LA TUBERÍA	70
9. ONDAS GUIADAS DE ULTRASONIDO	75
10. ONDAS NORMALES A LA SUPERFICIE DEL SENSOR CON MOVIMIENTO LONGITUDINAL	80
CONCLUSIONES	85
BIBLIOGRAFÍA	87
ANEXOS	88

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.Comportamiento de la señal de ultrasonido en interfaces acero/agua	15
Figura 2.Sistema compuesto por: anillo de emisión/detección de ultrasonido, tubo y agua	16
Figura 3.Generación de las ondas de ultrasonido por el efecto piezoeléctrico	17
Figura 4.Efecto de difracción en función del tamaño del obstáculo y abertura.	17
Figura 5.Resolución superficial y axial en función de la frecuencia de resonancia del sensor	18
Figura 6.Dispersión del haz	19
Figura 7.Relación del campo cercano en función del diámetro del piezoeléctrico y frecuencia.	19
Figura 8.Angulo de cobertura en función del diámetro del piezoeléctrico y su frecuencia en el agua.	20
Figura 9.Angulo de cobertura en función del diámetro del piezoeléctrico y su frecuencia en el acero.	20
Figura 10.Sistema compuesto por el anillo de ultrasonido y la tubería	21
Figura 11.Punto focal del sensor en el agua y el sistema agua-acero	22
Figura 12.Pérdidas de la señal en función de la frecuencia del piezoeléctrico	23
Figura 13.Patrón interferencia de 2 fuentes puntuales	25
Figura 14.Patrón de las fuentes puntuales en un ' <i>phased array</i> '	25
Figura 15.Frente de onda controlado por corrimiento de fase.	26
Figura 16.Comparación entre un ' <i>phased array</i> ' y un piezoeléctrico convencional	26
Figura 17.Corte realizado a la tubería para la simulación	27
Figura 18.Pulso gaussiano con media en $1e-6$.	27
Figura 19.Derivada pulso gaussiano.	28
Figura 20.Sistema de la simulación en 2d y 3d.	29
Figura 21.Conversión de sensores puntuales a lineales.	29
Figura 22.Flujo acústico de una carga cilíndrica.	30
Figura 23.Atenuaciones por distancias e interfaces.	31
Figura 24.Simulación de un solo piezoeléctrico en el sistema de agua y tubería	32
Figura 25.Señal obtenida de la simulación en Comsol 3,5 del sistema de la figura 24.	32
Figura 26.Configuración para determinar la directividad del arreglo de piezoeléctricos	33
Figura 27.Directividad en función de la distancia axial.	33
Figura 28.Gráfica del desplazamiento en el tubo de la señal de ultrasonido en isosuperficie	33
Figura 29.Gráfica del desplazamiento en el tubo de la señal de ultrasonido en contornos	33

Figura 30. Gráfica del desplazamiento en el tubo de la señal de ultrasonido en gradientes.	34
Figura 31. Señal de salida del arreglo de 20 piezoeléctricos	35
Figura 32. Gráfico de la sección transversal de la línea de extrusión axial.	35
Figura 33. Configuración del arreglo para determinar el tiempo de salida de cada piezoeléctrico.	35
Figura 34. Coordenadas cilíndricas del arreglo de 20 piezoeléctricos	36
Figura 35. Valores de los tiempos necesarios para que la señal de cada piezoeléctrico llegue al mismo tiempo a 4cm.	37
Figura 36. Señal obtenida de la simulación del sistema con foco en 4cm.	38
Figura 37. Gráfica de la sección transversal de la línea de extrusión axial.	38
Figura 38. Directividad en función de la distancia axial	39
Figura 39. Valores de los tiempos necesarios para que la señal de cada piezoeléctrico llegue al mismo tiempo a 2cm.	39
Figura 40. Señal obtenida de la simulación del sistema con foco en 2cm.	40
Figura 41. Directividad en función de la distancia axial	40
Figura 42. Comparación de la atenuación del primer y segundo eco de distintos arreglos.	41
Figura 43. Traslación y escalonamiento de la wavelet madre.	42
Figura 44. Descripción del procedimiento de la DWT.	43
Figura 45. Descripción del procedimiento de la DWT.	43
Figura 46. Señal madre wavelet escogida	44
Figura 47. Selección del nivel de la DWT, por medio la curtosis	45
Figura 48. Método del umbral suave	45
Figura 49. Transformada inversa wavelet	45
Figura 50. Señal de entrada con ruido gaussiano, detalle del segundo eco	46
Figura 51. Segundo eco con un SNR de 40dB y la reconstrucción de la señal por DWT	47
Figura 52. Segundo eco con un SNR de 35dB y la reconstrucción de la señal por DWT	47
Figura 53. Segundo eco con un SNR de 30dB y la reconstrucción de la señal por DWT	47
Figura 54. Potencia de ruido permitida en función del voltaje de entrada con SNR de 40dB.	48
Figura 55. Correlación cruzada entre la señal del piezoeléctrico y la de excitación	50
Figura 56. Detección de envolvente y umbralización.	50
Figura 57. Segmentación de los ecos	51
Figura 58. Caracterización de los ecos.	51
Figura 59. Determinación de las características de los ecos	56
Figura 60. Matriz de covarianza	61
Figura 61. Relación de los datos en función de la covarianza	61
Figura 62. Porcentaje de la varianza en el primer y segundo	62

componente principal	
Figura 63. Características de las señales de salida en función de sus componentes principales.	62
Figura 64. Resumen del proceso del análisis de componentes principales	63
Figura 65. Especificaciones de sistemas difusos general y particular	63
Figura 66. Antecedente y consecuente en la interpretación de las reglas	64
Figura 67. Grado de pertenencia de cada una de las salidas en función de la PCA1.	66
Figura 68. Grado de pertenencia de cada una de las salidas en función de la PCA2.	66
Figura 69. Grado de pertenencia de cada una de las salidas en función de la PCA3.	67
Figura 70. Grado de pertenencia de cada categoría de salida	67
Figura 71. Promedio de las funciones de pertenencia de todas las categorías	68
Figura 72. Método de implicación utilizando el operador de truncamiento min	68
Figura 73. Defuzzificación de la función resultante de la agregación de todas las salidas	68
Figura 74. Configuración del FIS.	69
Figura 75. Sistema a simular por elementos finitos.	70
Figura 76. Cobertura del haz generado por el sensor de ultrasonido en el tubo.	71
Figura 77. Sistema compuesto por 64 sensores y su cobertura en el tubo	71
Figura 78. Perfil del tubo generado en Matlab, por las señales obtenidas de la simulación de los sensores de ultrasonido.	72
Figura 79. Perfil del tubo generado en Matlab, por la señal obtenida de una fisura con el alto o el ancho menor a 1cm.	72
Figura 80. Perfil del tubo generado en Matlab, por la señal obtenida de una fisura con el alto o el ancho entre 1cm a 2cm.	73
Figura 81. Perfil del tubo generado en Matlab, por la señal obtenida de una fisura con el alto o el ancho entre 2cm a 4cm.	73
Figura 82. Perfil del tubo generado en Matlab, por la señal obtenida de una fisura superficial en la pared interior con el alto o el ancho entre 2cm a 4cm.	73
Figura 83. Perfil del tubo generado en Matlab, por la señal obtenida de una fisura interna con el alto o el ancho entre 2cm a 4cm.	74
Figura 84. Perfil del tubo generado en Matlab, por la señal obtenida de una fisura superficial en la pared exterior con el alto o el ancho entre 2cm a 4cm.	74
Figura 85. Ondas longitudinales y transversales refractadas producidas por una onda incidente con un ángulo con la vertical.	75
Figura 86. Radio de energía en función del ángulo de incidencia en agua/acero.	76
Figura 87. Vista transversal de las ondas de ultrasonido en un tubo y	77

un bloque.	
Figura 88. Configuraciones de distintas posiciones de fisuras para determinar su atenuación.	77
Figura 89. Configuración del sistema con ondas guiadas.	79
Figura 90. Desplazamiento del anillo de sensores de ultrasonido en la tubería.	80
Figura 91. Medidas de la cobertura del haz del sensor en 3D.	81
Figura 92. Desplazamiento del sensor comparado con el volumen de cobertura de su haz.	81
Figura 93. Distancia a la cual se activa el pulso de excitación del sensor en movimiento.	84

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Especificaciones técnicas del piezoeléctrico a simular.	23
Tabla 2. Transformadas Wavelet discreta y continua.	42
Tabla 3. Pasos necesarios en la extracción de ruido mediante la DWT.	43
Tabla 4. Relación voltaje de entrada con la potencia de la señal y el ruido con SNR de 40dB.	48
Tabla 5. Pasos necesarios para la caracterización de los ecos.	49
Tabla 6. Nombre y significado de las características.	52
Tabla 7. Configuraciones de los sistemas en la simulación.	53
Tabla 8. Descripción de los nombres de los términos de salida.	57
Tabla 9. Resultado de la caracterización de todos los términos de salida.	57
Tabla 10. Pasos necesarios en la reducción de variables por PCA.	59
Tabla 11. Pasos necesarios en la aplicación de un sistema de inferencia Mamdani.	65
Tabla 12. Atenuaciones de los sistemas de la figura 88.	78
Tabla 13. Comparación entre las configuraciones de ondas normales y ondas guiadas.	79

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL PIEZOELÉCTRICO TC3027.	89
ANEXO B. ALGORITMO PARA OBTENER LAS GRÁFICAS DE DIRECTIVIDAD.	91
ANEXO C. ALGORITMO PARA OBTENER LOS TIEMPOS DE ACTIVACIÓN DE CADA PIEZOELÉCTRICO.	93
ANEXO D. CÓDIGO PARA LA EXTRACCIÓN DE RUIDO DE LA SEÑAL	94
ANEXO E. CÓDIGO PARA LA EXTRACCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS ECOS	95
ANEXO F. MATRIZ DE CARACTERÍSTICAS DE CADA CATEGORÍA DE SALIDA	97
ANEXO G. CÓDIGO DE LOS PASOS PARA EL ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES	98
ANEXO H. PARTES QUE INTERVIENEN EN LOS SISTEMAS DE INFERENCIA 'FUZZY'	99
ANEXO I. CÓDIGO PARA LA CLASIFICACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS ECOS	103
ANEXO J. CÓDIGO PARA LA GENERACIÓN DEL PERFIL DE LA TUBERÍA	106
ANEXO K. CÓDIGO DE LA FUNCIÓN GRAFICADORA DE LA FISURA EN LA TUBERÍA	107

RESUMEN ESPAÑOL

TITULO:CARACTERIZACIÓN DE TUBERÍAS POR ULTRASONIDO ORIENTADA A SISTEMAS DE INSPECCIÓN MÓVIL.

AUTOR: Juan Manuel Salazar Rodríguez

PALABRAS CLAVES: Tubería, fisuras, ultrasonido y simulación.

A causa del tiempo de servicio, el medio y el flujo en los sistemas de tuberías de transmisión antiguos de agua, gas o petróleo, se evidencia debilitamiento en sus paredes que provocan fisuras y posteriores fugas. Estas producen un daño ambiental y económico.

El rápido incremento de la instalación de tuberías cada año como el mantenimiento de las antiguas exige sistemas de inspección que utilicen nuevas tecnologías en el mercado nacional para dar un servicio de mayor calidad y precisión. Estas nuevas tecnologías son prestadas por empresas extranjeras, las cuales ofrecen estos servicios con alto costo y baja disponibilidad inmediata.

Por estas razones el mercado nacional de transporte de flujos en los últimos años ha mostrado interés en el desarrollo de tecnologías de inspección que viajan dentro del tubo como el denominado '*smart pig*'.

Se propone la simulación de un anillo compuesto por piezoeléctricos de emisión/defección de ultrasonido, el cual tenga un desplazamiento por una tubería de acero que contenga agua, como un módulo del '*smart pig*'. Esta tecnología determinaría la geometría interna del tubo y las posibles fisuras por medio de ultrasonido.

El ultrasonido se propaga con una velocidad determinada en un medio, dependiendo de su densidad. Cuando la onda de ultrasonido pasa de un material a otro una parte se refleja (eco) y otra parte se transmite. El tiempo en que viaja el eco de la señal al punto de origen, determina la distancia en que se encuentra las fisuras e interfaces.

* Proyecto de Grado

** Facultad Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela: Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director Dr. Oscar Gualdrón González.

ENGLISH ABSTRACT

TITLE: ULTRASONIC CHARACTERIZATION OF PIPES DIRECTED TO MOBILE INSPECTION

AUTHOR: Juan Manuel Salazar Rodríguez

KEY WORDS: Pipe, cracks, ultrasound and simulation.

Because the service time, the medium and flow in piping systems of old transmission of water, gas or oil, is evident weakening in the walls causing cracks and subsequent leaks. They produce an environmental and economic damage.

The rapid increase in each year pipe installation and the maintenance of old systems requires examination using new technologies in the market to give a higher quality service and accuracy. These new technologies are provided by foreign companies, which offer these services at high cost and low availability immediately.

For these reasons, the national transport market flows in recent years has shown interest in the development of inspection technologies that travel inside the tube as the called 'smart pig'.

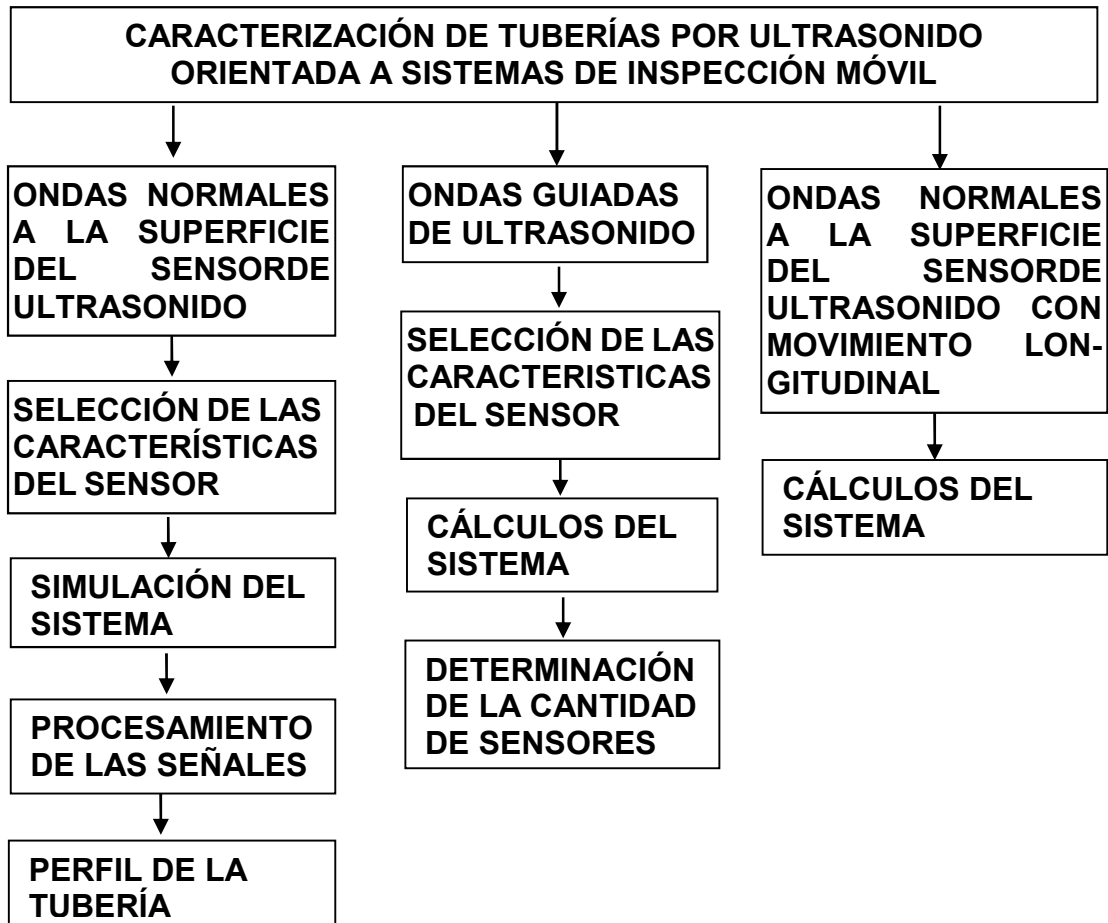
It is proposed to simulate a ring composed of piezoelectric emission/defection of ultrasound, which has a displacement by a steel pipe containing water, as a form of 'smartpig'. This technology would determine the internal geometry of the tube and possible cracks by ultrasound.

The ultrasound propagates with a speed determined in a material, depending on its density. When the ultrasound wave passes from one material to another part is reflected (echo) and some is transmitted. The traveling time of the echo signal to the point of origin, determines the distance that is cracks and interfaces.

* Grade Project

** Faculty: Physic-mechanical Engineering Faculty. School: School of Electrical, Electronics and Telecommunications Engineering. Research group: CPS. Director: PhD. Oscar Gualdrón González.

1. INTRODUCCIÓN



Debido al tiempo de servicio, al medio y al flujo los sistemas de tuberías de transmisión antiguos de agua, gas o petróleo evidencian debilitamiento en sus paredes que provocan fisuras y luego fugas. Estas fugas en las tuberías producen un daño ambiental y económico.

El rápido incremento de la instalación de tuberías cada año como el mantenimiento de las antiguas exige sistemas de inspección que utilicen nuevas tecnologías en el mercado nacional para dar un servicio de mayor calidad y precisión. Estas nuevas tecnologías son prestadas por empresas extranjeras, las cuales ofrecen estos servicios con alto costo y baja disponibilidad inmediata.

Por estas razones el mercado nacional de transporte de flujos en los últimos años ha mostrado interés en el desarrollo de tecnologías de inspección que viajan dentro del tubo como el denominado 'smart pig'.

2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El problema que se presenta a nivel nacional es el alto índice de agua no contabilizada 49%, el cual se representa por la siguiente relación:

$$\frac{\text{Volumen Pr oducido} - \text{VolumenFacturado}}{\text{Volumen Pr oducido}} * 100\%;$$

Este índice muestra que por cada 100 m³ de agua transmitida en el camino se pierden 49 m³, los cuales se atribuyen a errores de medición pero sobre todo a fugas en las tuberías de transmisión.

Se propone el desarrollo de un anillo de emisión/defección de ultrasonido que esté orientado a la movilidad, como un módulo del 'smart pig'. Esta tecnología determinaría la geometría interna del tubo y las posibles fisuras por medio de ultrasonido.

El ultrasonido se propaga con una velocidad determinada en un medio, dependiendo de su densidad. Cuando la onda de ultrasonido pasa de un material a otro una parte se refleja (eco) y otra parte se transmite. El tiempo en que viaja el eco de la señal al punto de origen, determina la distancia en que se encuentran las fisuras e interfaces.

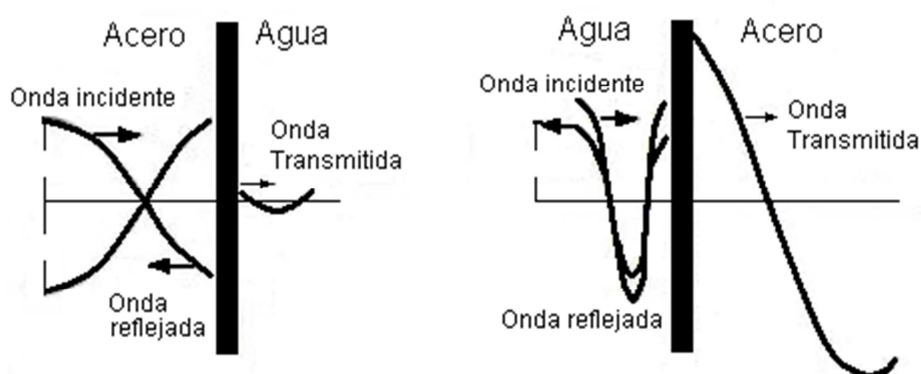


Figura 1. Comportamiento de la señal de ultrasonido en interfaces acero/agua y agua/acero. Fuente: autor.

El anillo está compuesto por piezoeléctricos de emisión/defección de ultrasonido, y este se desplaza por una tubería de acero que contiene agua, como se muestra en la figura 2. Para determinar las características de este sistema se realizarán los siguientes pasos:

- Selección del piezoeléctrico de emisión/detección.
- Simulación del sistema con solo un piezoeléctrico, mediante elementos finitos.
- Procesamiento de la señal de ultrasonido recibida de los ecos de las paredes de los tubos.
- Clasificación de los ecos.

- Simulación del sistema con sólo un piezoeléctrico, mediante ondas guiadas, utilizando elementos finitos.
- Determinación de la mínima cantidad de piezoeléctricos en el anillo con una cobertura completa de la señal de ultrasonido en el tubo.
- Simulación del sistema con todos los piezoeléctricos, para determinar el perfil de la tubería.

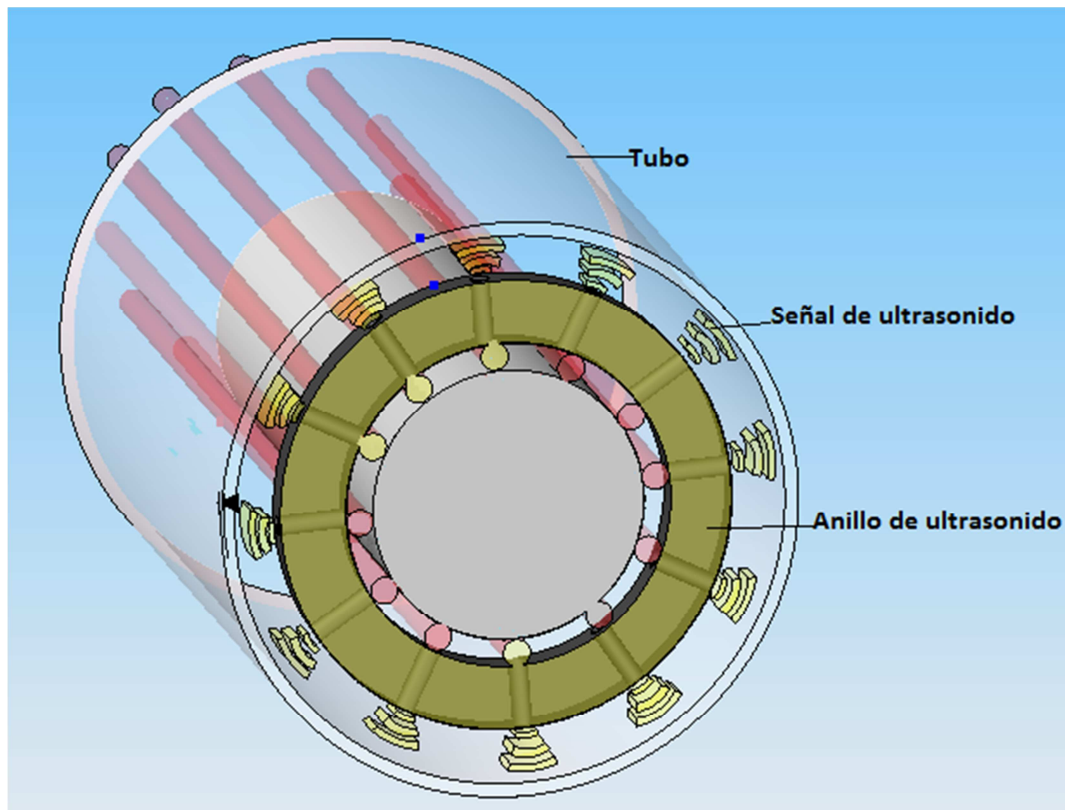


Figura 2. Sistema compuesto por: anillo de emisión/detección de ultrasonido, tubo y agua.
Fuente: autor.

3. SELECCIÓN DEL PIEZOELECTRICO DE ULTRASONIDO

Los transductores de ultrasonido vienen en una amplia variedad de tamaños, frecuencias y estilos, pero la mayoría tienen una estructura interna común. Normalmente, el elemento activo del transductor es un disco delgado, un cuadrado o rectángulo de cerámica piezoeléctrica que convierte la energía eléctrica en energía mecánica (vibración ultrasónica), y viceversa. Estos transductores actúan con ondas longitudinales, las cuales son producidas por vibraciones mecánicas del elemento piezoeléctrico.

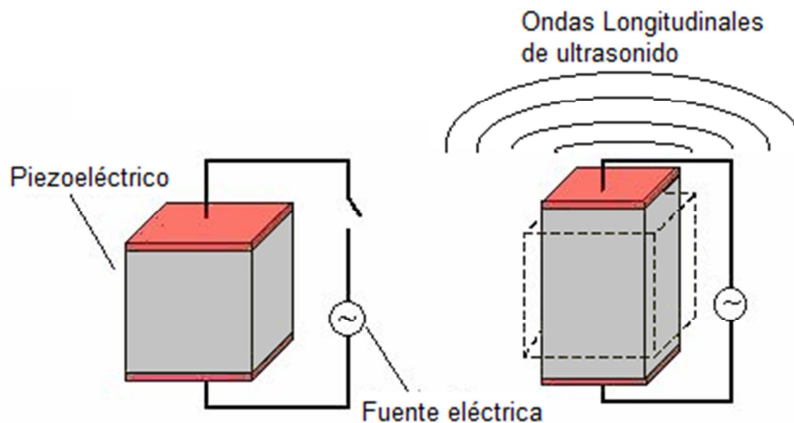


Figura 3. Generación de las ondas de ultrasonido por el efecto piezoeléctrico. Fuente: autor.

3.1. Sensibilidad en función de la frecuencia de resonancia

La frecuencia de resonancia del piezoeléctrico es el número de ondas completas producidas por la deformación del piezoeléctrico en un periodo de tiempo. La mayoría de las pruebas por ultrasonido se realizan en el rango de frecuencias entre 500 kHz y 20 MHz.

f = frecuencia de resonancia.

C = Velocidad del sonido del material.

$$\lambda = \frac{c}{f} = \text{Longitud de onda};$$

ecuación 1.

En la figura 4 se observa el fenómeno de difracción. Cuando el obstáculo, en este caso la fisura en el tubo, tiene un tamaño mayor en su alto o ancho a la longitud de onda no se presenta el efecto de difracción.

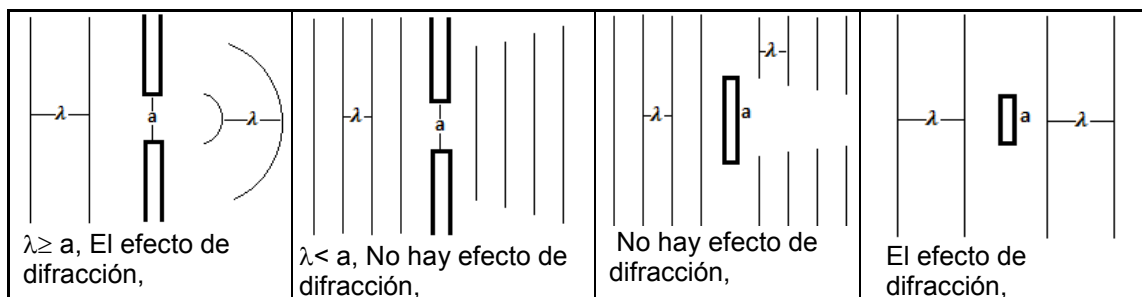


Figura 4. Efecto de difracción en función del tamaño del obstáculo y abertura. Fuente: autor.

Primera condición: el tamaño de la fisura superficial debe ser mayor a la longitud de onda $a \geq 2\lambda$.

La velocidad del sonido en el tubo depende del material de construcción. Para tuberías de acero su velocidad de sonido es $5000 \frac{m}{s}$.

Se escoge el tamaño de la fisura superficial en un centímetro, y teniendo en cuenta la primera condición, en la cual la onda de ultrasonido no presenta el efecto de difracción.

a = Tamaño superficial de la fisura;

$$a = 2\lambda;$$

$$0.01 = 2\lambda;$$

$$\lambda = 0.005;$$

Con esta longitud de onda y la velocidad del sonido en el acero, se despeja la frecuencia de resonancia del sensor.

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{5000 \frac{m}{s}}{0.005m} = 1\text{Mhz};$$

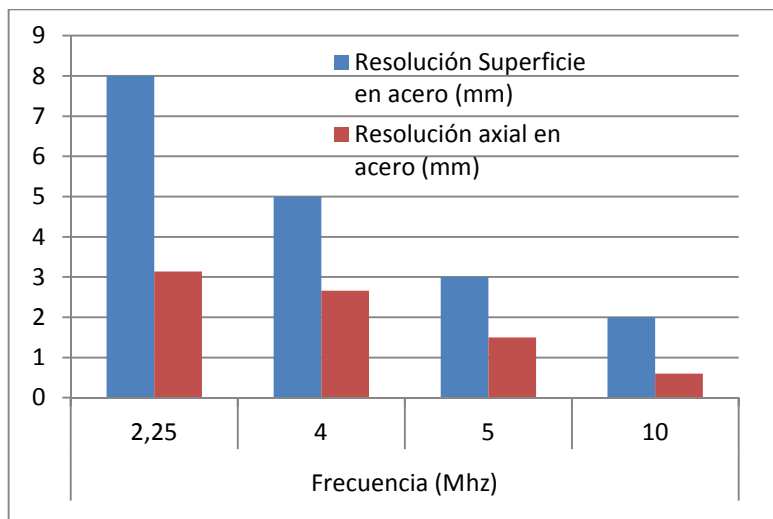


Figura 5. Resolución superficial y axial en función de la frecuencia de resonancia del sensor. Fuente: autor.

En la gráfica 5 se comparan las resoluciones superficiales y axiales en función de la frecuencia. Cuando aumenta la frecuencia se tienen mejores resoluciones, siendo la axial más pequeña que la superficial.

Extrapolando linealmente la figura 5, para una frecuencia de 1MHz se tendrían resoluciones superficial y axial respectivamente de 7,0179mm y 2,7545mm.

Segunda condición: entre mayor sea la frecuencia de resonancia del piezoeléctrico éste tendrá mayor resolución superficial y axial.

3.2. Campo cercano y ángulo de dispersión

En la zona que está a una distancia axial menor a N del sensor, se le denomina

campo cercano, en ésta no se pueden leer las señales de ultrasonido, de manera que cualquier objeto que esté en esta zona no será detectado. El foco del sensor es el punto donde el sensor tendrá mayor emisión y recepción de la señal de ultrasonido. Este punto se encuentra en N como se muestra en la figura 6.A medida que la señal emitida se aleja del sensor ésta se atenúa, de la forma que se observa en el corte longitudinal del sensor.

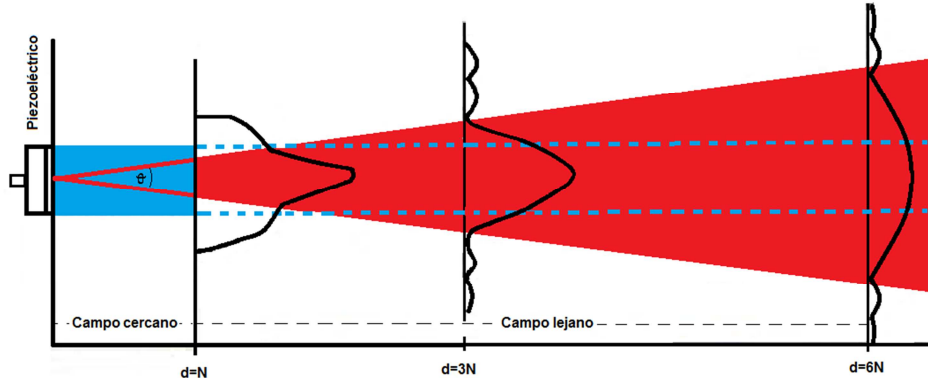


Figura 6. Dispersión del haz. Fuente: autor.

La ecuación 2 representa el campo cercano en función del diámetro, frecuencia y longitud de onda del sensor.

$D = \text{Diámetro del sensor}$ Attenuation

$$N = \text{Campo cercano} = \frac{D^2 f}{4\lambda};$$

ecuación 2

La ecuación 3 representa la dispersión del haz en función del diámetro y la longitud de onda del sensor.

$$\theta = 2 * \sin^{-1} \left(\frac{0,5 * \lambda}{D} \right);$$

ecuación 3.

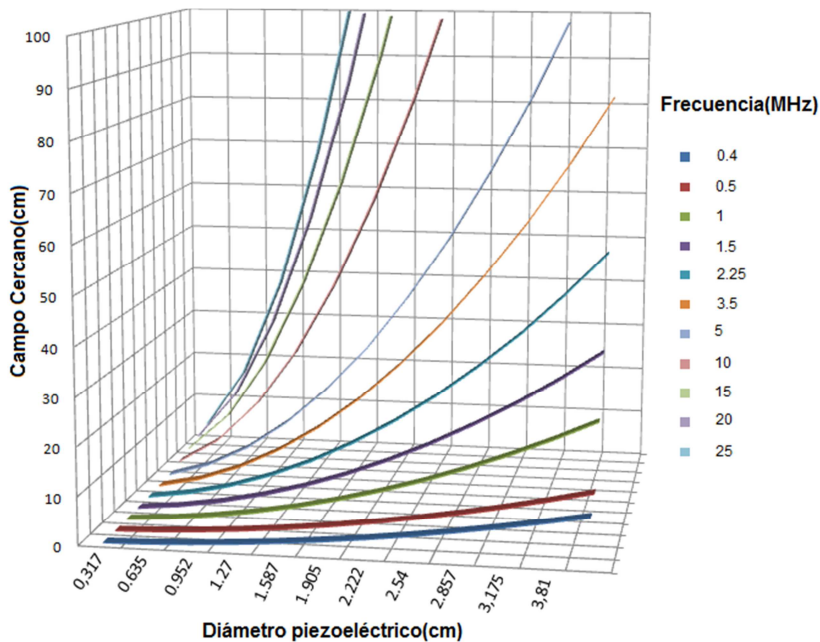


Figura 7. Relación del campo cercano en función del diámetro del piezoeléctrico y su frecuencia. Fuente: autor.

Como se observa en la figura 7 y en la ecuación 2, cuando se aumenta el diámetro del sensor y la frecuencia, también aumenta su campo cercano, es decir su foco estará más lejos.

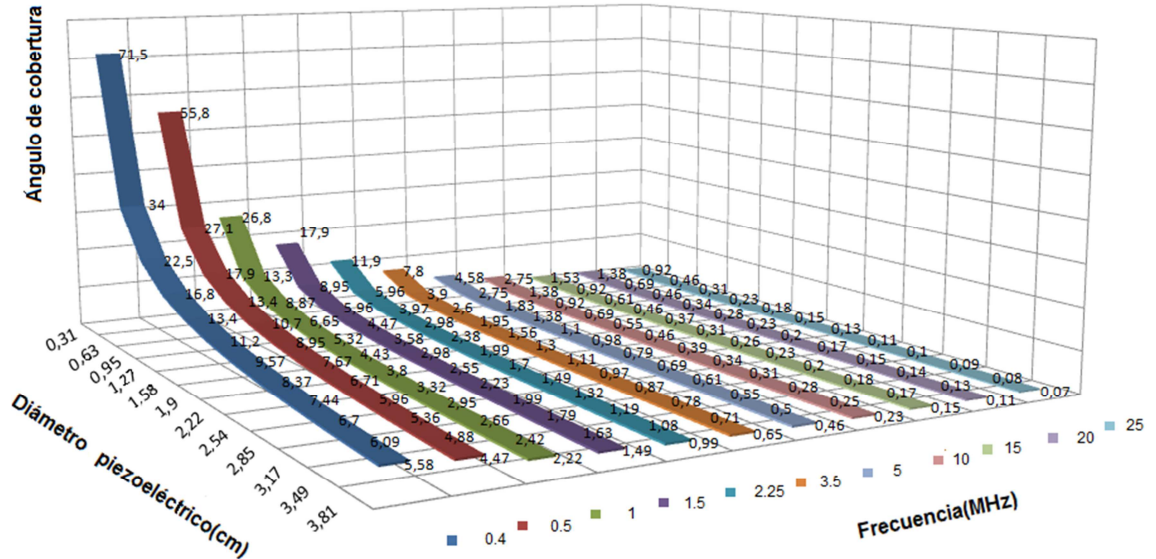


Figura 8. Ángulo de cobertura en función del diámetro del piezoeléctrico y su frecuencia en el agua. Fuente: autor.

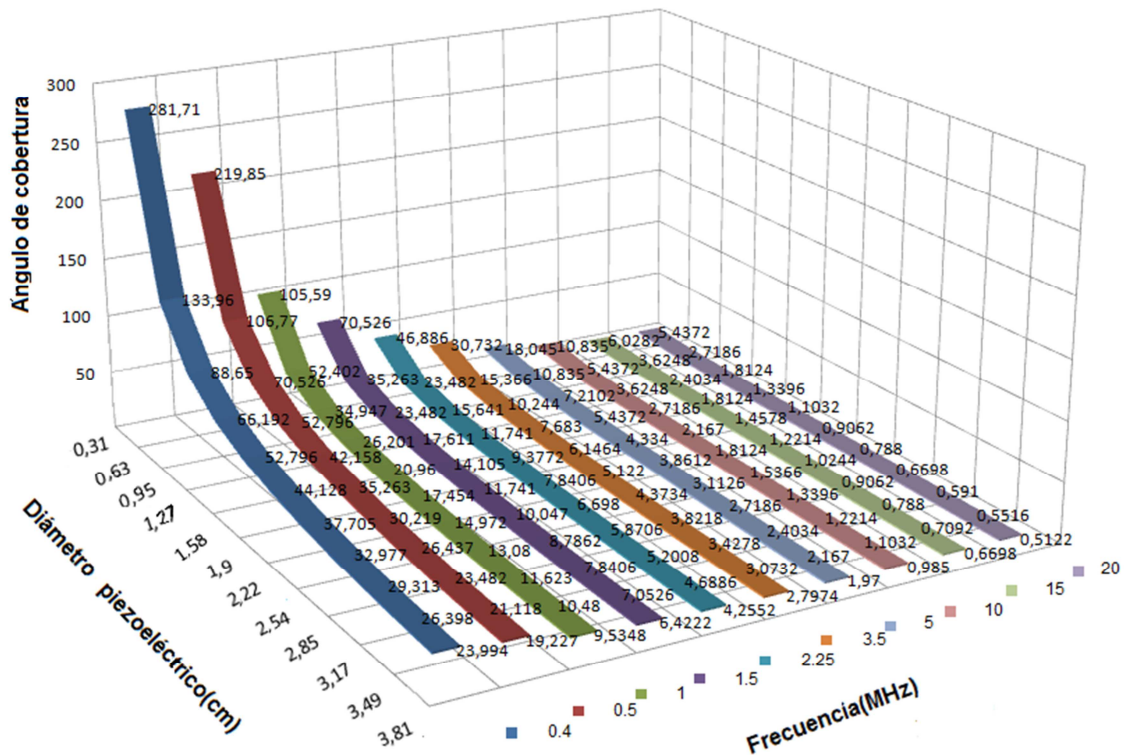


Figura 9. Ángulo de cobertura en función del diámetro del piezoeléctrico y su frecuencia en el acero. Fuente: autor.

En la figura 9 y en la ecuación 3 se observa como el ángulo de dispersión del haz de ultrasonido cambia en función de la velocidad del sonido, frecuencia y el

diámetro del piezoeléctrico. Si la longitud del camino recorrido por el haz de sonido es mas larga que la distancia de campo cercano N , el diámetro del haz del rayo también aumentará en un ángulo α . De la ecuación 1 se puede observar que la dispersión del haz aumenta para las frecuencias más bajas y los menores diámetros el piezoeléctrico.

Un angulo grande del haz de dispersión puede causar que la energía sonora por unidad de área decaiga rápidamente con la distancia, reduciendo la sensibilidad de reflexión a las pequeñas fisuras.

Tercera condición: A mayores frecuencias menor dispersión del haz y mayor energía concentrada.

3.3. Punto focal en el material de ensayo en el agua

En la figura 10 se observa el anillo con los sensores de ultrasonido dentro de la tubería llena de agua. La distancia axial de los sensores a la pared de la tubería, denominada D_{agua} , debe ser mayor que la del campo cercano N , para que la señal del sensor pueda ser leída.

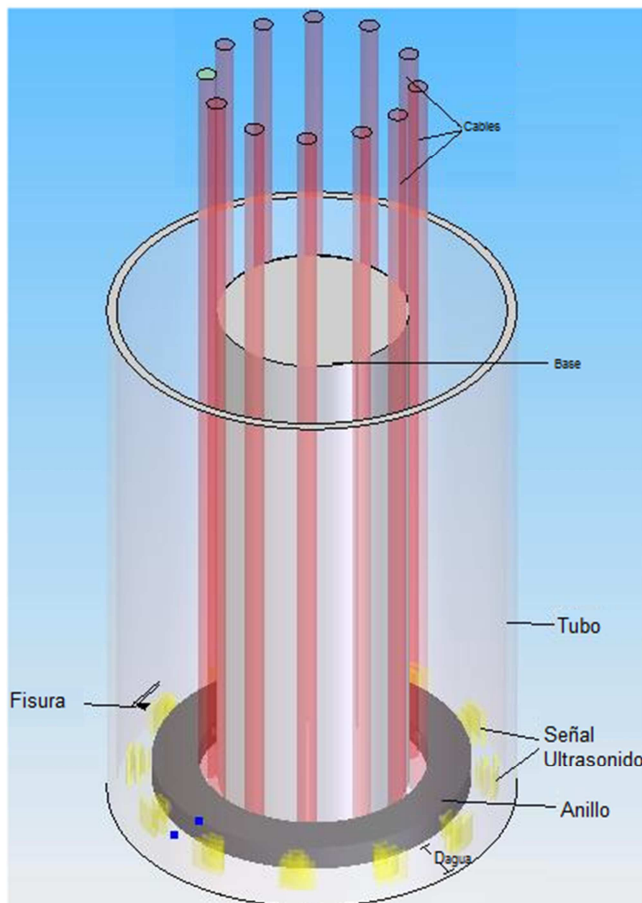


Figura 10. Sistema compuesto por el anillo de ultrasonido y la tubería. Fuente: autor.

En la ecuación 4 y la figura 11 se encuentra la distancia del sensor a la pared del tubo en función de: la zona cercana del haz en el agua, la distancia en el material de ensayo (acero), la velocidad del sonido del acero y agua.

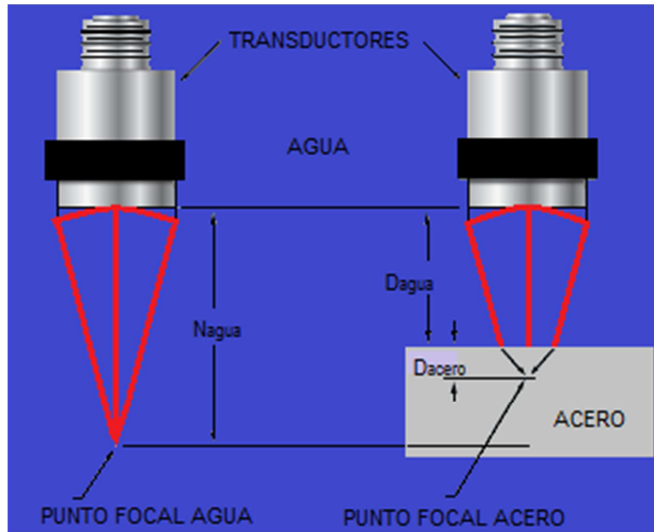


Figura 11. Punto focal del sensor en el agua y el sistema agua-acero. Fuente: autor.

D_{agua} = Distancia Piezoeléctrico en agua

N_{agua} = Zona cercana en agua

D_{acero} = Distancia en el material de ensayo

v_{acero} = Velocidad del sonido en el acero

N_{agua} = Velocidad del sonido agua

$$D_{agua} = N_{agua} - D_{acero} * \left(\frac{v_{acero}}{v_{agua}} \right);$$

ecuación 4

$$D_{acero} = 0,01529 - 0,001 * \left(\frac{5000}{1500} \right); 0,01195m$$

3.4. Atenuación

La pérdida de la amplitud debida a la atenuación a través de un camino determinado es la suma de los efectos de la absorción y dispersión que aumentan linealmente con la frecuencia. En un determinado material, con una temperatura dada y una frecuencia se tendrá un coeficiente de atenuación específico, expresado en nepers por centímetro (Np/cm). Una vez que este coeficiente se conoce las pérdidas se pueden calcular según la ecuación 5.

ρ = Presion del sonido al final del camino

ρ_0 = Presion del sonido al comienzo del camino

a = Coeficiente de atenuacion

d = Longitud del camino

$$\rho = \rho_0 e^{-ad};$$

ecuación 5

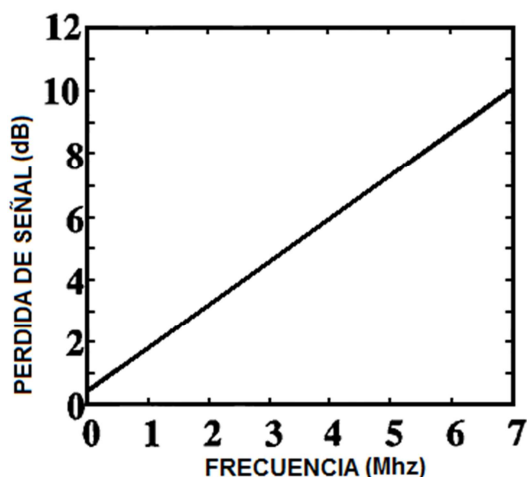


Figura 12. Pérdidas de la señal en función de la frecuencia del piezoeléctrico. Fuente: autor.

Cuarta condición: entre mayor sea la frecuencia de resonancia del piezoeléctrico este tendrá mayor atenuación.

La configuración del sistema a simular se presenta en la figura 10. El piezoeléctrico está a una distancia D_{agua} de la pared del tubo rodeado de agua. Su desplazamiento provocará gran ruido, que junto con la atenuación de la alta frecuencia de ultrasonido pueden llevar a que la señal del eco de ultrasonido sea ilegible. Por este motivo la atenuación es el factor más importante en la selección de la frecuencia de resonancia.

La resolución es el segundo factor a considerar en la selección de la frecuencia de resonancia, debido a que la física ondulatoria establece que a mayores frecuencias mejor resolución.

Adicionalmente el piezoeléctrico debe tener un diámetro reducido para disminuir la longitud de la zona cercana y tener un foco natural lo más cercano posible ya que el piezoeléctrico está cerca de la pared del tubo.

Como consecuencia de todas las anteriores consideraciones y atendiendo a la oferta comercial para este tipo de dispositivos, se ha escogido un piezoeléctrico con: una frecuencia de 1MHz, un diámetro menor de 1cm, una resolución superficial de 1cm en el acero y una distancia de 0,01195 m del sensor a la pared del tubo.

Las características del piezoeléctrico escogido se encuentran en el anexo A. La tabla 1 muestra el resumen de sus propiedades.

Tabla 1. Especificaciones técnicas del piezoeléctrico a simular.

Frecuencia de resonancia	MHz
Sensibilidad de transmisión	$170\text{dB} \pm 3\text{dben } 1\text{Mhz}(re\ 1\mu\text{Pa}/V)$
Sensibilidad de recepción	$-201\text{dB} \pm 3\text{dben } 1\text{Mhz}(re\ 1V/\mu\text{Pa})$
Impedancia	140 Ohm $\pm 30\%$ en 1Mhz
Patrón de directividad	5,8 grados
Potencia máxima de entrada	10W (1% del ciclo útil)

3.5. Potencia del piezoeléctrico

Reemplazando en las ecuaciones 6 y 7 los valores del piezoeléctrico de referencia del anexo A, se obtiene su ciclo útil y su potencia, está no supera la tolerada según el fabricante (125mW).

$$Ciclo\acute{u}til = \frac{1}{2f} = \frac{1}{2*1000000} = 5e-7s; \quad \text{ecuación 6}$$

$$P_t = \frac{Ciclo\acute{u}til * V^2}{Z} = \frac{5e-7 * 120^2}{140} = 5,142e-5W; \quad \text{ecuación 7}$$

3.6. Sensibilidad del piezoeléctrico

Según las características del piezoeléctrico TC3027 mostradas en la tabla 1, la sensibilidad de transmisión es 170 dB re 1 μ Pa/V. Por medio de la ecuación 6 se calcula la presión generada en el piezoeléctrico mediante la aplicación de un pulso de excitación de 120V en 0.5 microsegundos.

$$20\log \frac{K \frac{\mu P}{V}}{\frac{\mu P}{V}} = 170dB ; 20\log K = 170dB; K = 10^{8,5}; \quad \text{ecuación 8}$$

$$M = 10^{8,5} \frac{\mu P}{V};$$

$$P = 10^{8,5} \frac{\mu P}{V} * 120V = 37947P\bar{a};$$

La presión generada en el piezoeléctrico, es inferior comparada con la presión atmosférica (100000Pa).

4. SIMULACIÓN DEL SISTEMA

4.1. Simulación del piezoeléctrico mediante un '*phased array*'

El principio de interacción constructiva y destructiva de las ondas fue demostrado por el científico Inglés Thomas Young en 1801, en un experimento en el que utilizó dos fuentes puntuales de luz para crear patrones de interferencia. Las ondas que se combinan en fase se refuerzan entre sí, mientras que las ondas que se combinan fuera de fase se cancelan entre sí.

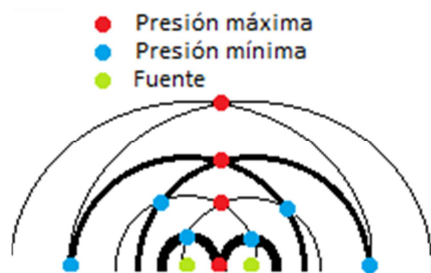


Figura 13. Patrón interferencia de 2 fuentes puntuales. Fuente: autor.

El cambio de fase es una forma de controlar estas interacciones, por el tiempo de desplazamiento de los frentes de onda que se originan a partir de dos o más fuentes. Esto puede ser utilizado para dirigir o enfocar la energía de un frente de onda resultante.

Un '*phased array*' es simplemente un arreglo de fuentes de ultrasonido separadas entre sí formando estructuras determinadas (lineal, anular, circular o rectangular).

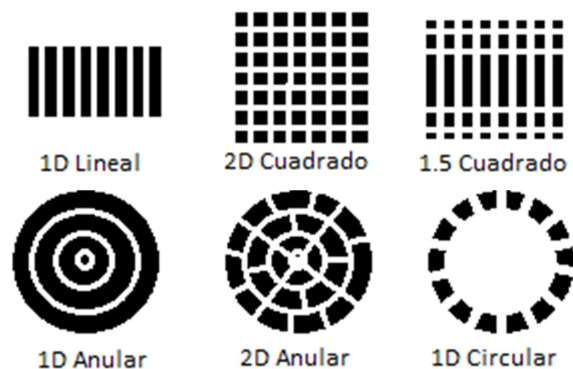


Figura 14. Patrón de las fuentes puntuales en un '*phased array*'. Fuente: autor.

El corrimiento de fase se refiere a cómo los elementos de un arreglo son activados de forma secuencial por impulsos, con lo cual se genera un frente de onda controlado como se observa en la figura 15. Un '*phased array*' se basa normalmente en un conjunto de piezoeléctricos de ultrasonido que contiene muchos elementos individuales (típicamente 16 a 256) que pueden ser pulsados por separado en un patrón programado.

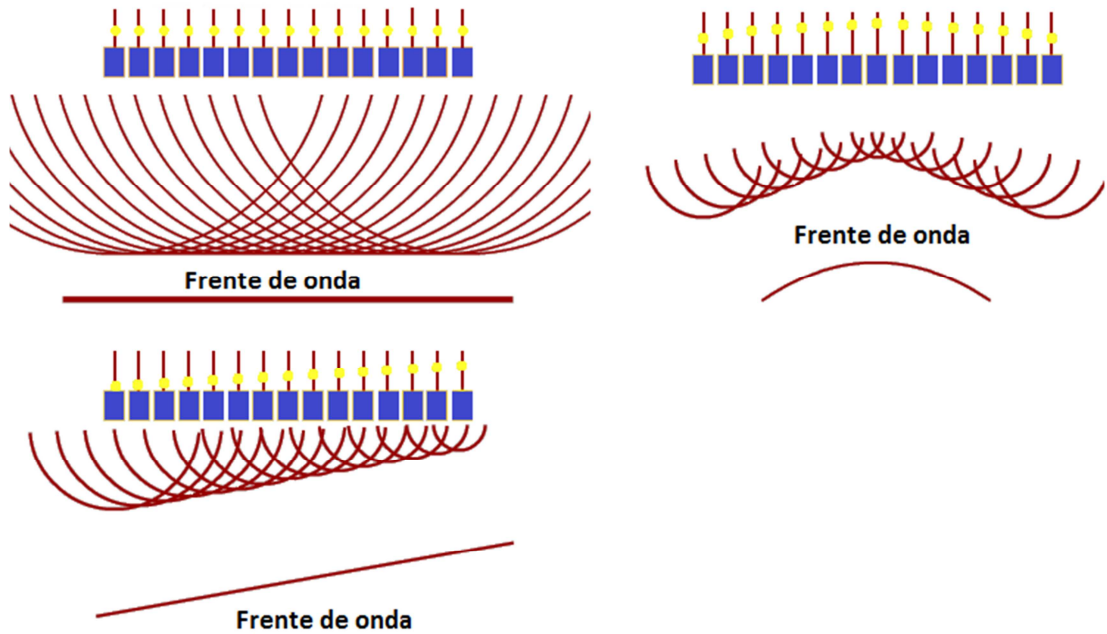


Figura 15. Frente de onda controlado por corrimiento de fase. Fuente: autor.

Las ventajas del '*phased array*' en comparación con los piezoeléctricos convencionales son:

- Control del ángulo del haz.
- Control de la distancia focal.
- Mayor Zona de cobertura.

**Piezoeléctrico
Convencional**

'Phased array'

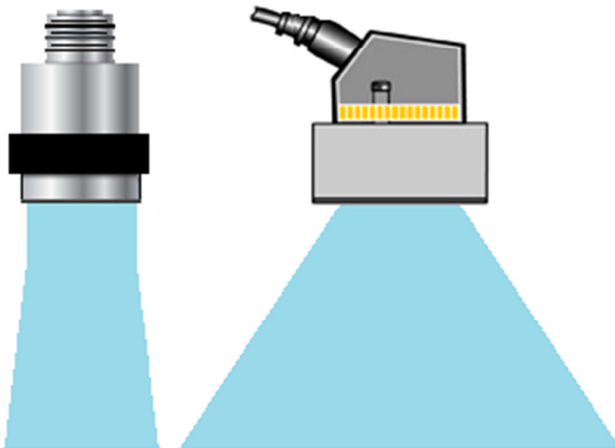


Figura 16. Comparación entre un '*phased array*' y un piezoeléctrico convencional. Fuente: autor.

Las desventajas de los sistemas '*phased array*' es su costo más elevado comparado con los sensores tradicionales. Sin embargo estos costos son compensados por su mayor flexibilidad y una reducción en el tiempo requerido para realizar una inspección.

El sistema de la simulación está compuesto por: el corte de la tubería de acero mostrada en la figura 17, agua en su interior y el arreglo de los sensores.

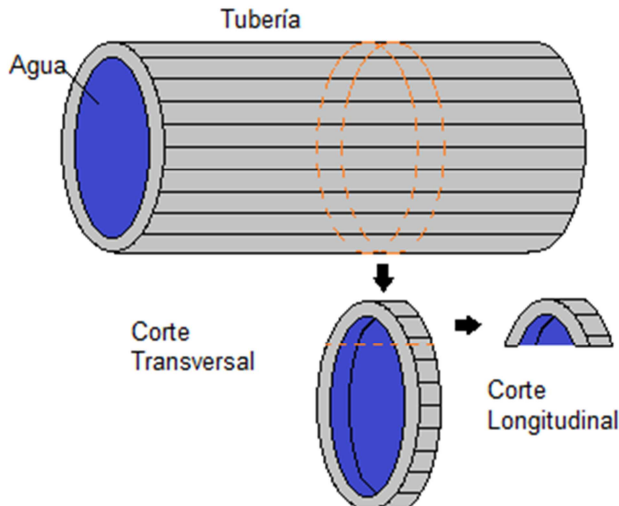


Figura 17. Corte realizado a la tubería para la simulación. Fuente: autor.

Mediante una herramienta software para elementos finitos (Comsol 3,5a), se utiliza un arreglo de 20 piezoeléctricos puntuales, estos emiten un frente de onda gaussiana a 1MHz, el cual obedece a la ecuación diferencial 9:

$$\nabla, \left(-\frac{1}{\rho_0} \nabla \rho \right) - 1/(\rho_0 C_s^2) \frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} = -A 2\pi^2 f_0^2 (t - t_p) \exp(-\pi^2 f_0^2 (t - t_p)^2); \quad \text{ecuación 9}$$

La función al lado derecho de la ecuación 9 representa la forma de onda de la presión generada en cada una de los 20 piezoeléctricos puntuales. Esta señal es la derivada de un pulso gaussiano como se muestra en la figura 18 y 19.

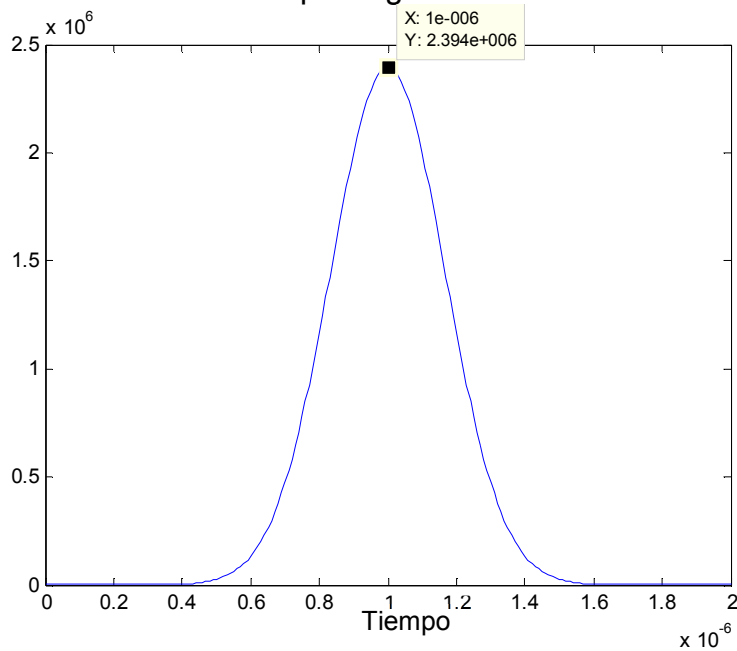


Figura 18. Pulso gaussiano con media en 1e-6. Fuente: autor.

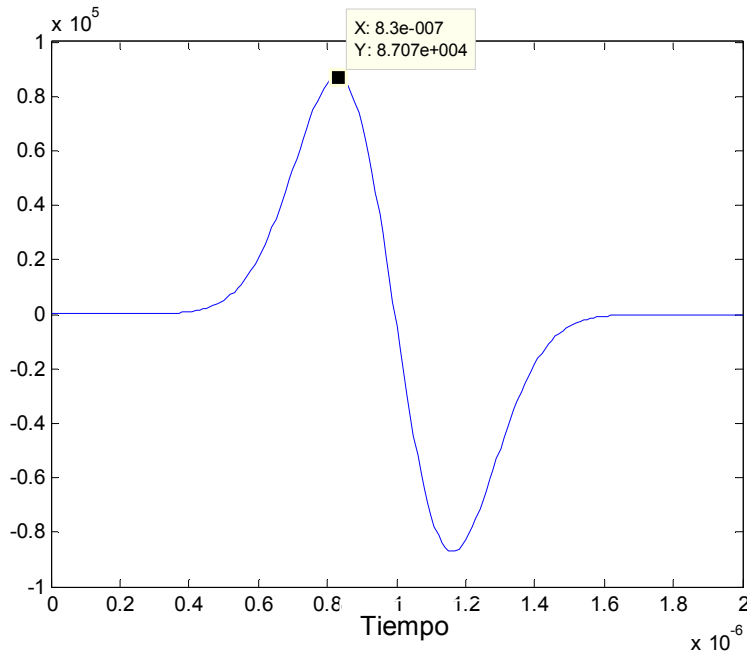


Figura 19. Derivada pulso gaussiano. Fuente: autor.

4.2. Parámetros de la simulación

- Frecuencia de resonancia de los piezoeléctricos; $f_0 = 1 \text{ Mhz}$.
- Velocidad del sonido de: agua $C_1 = 1500 \frac{m}{s}$, acero $C_2 = 5000 \frac{m}{s}$.
- Densidad de: agua $\rho_1 = 1000 \frac{Kg}{m^3}$, acero $\rho_2 = 7800 \frac{Kg}{m^3}$.
- Impedancia acústica de: agua $Z_1 = \rho * C_1, 15e5 \frac{Kg}{m^2s}$, acero $Z_2 = \rho * C_2, 390e5 \frac{Kg}{m^2s}$.
- Longitud de onda de: agua $\lambda_1 = \frac{C}{f_0} = 0,0015m$, acero $\lambda_2 = \frac{C}{f_0} = 0,005m$.
- Periodo; $\frac{1}{f_0} = 1e-6s$.
- Número de elementos por longitud de onda: $N=6$.
- Tamaño del elemento de la malla; $h_{1max} = \frac{\lambda}{N} = 2,5e-4, h_{2max} = \frac{\lambda}{N} = 8,333e-4m$.
- Tamaño del paso del tiempo; $T_{paso} = 0,05 * \lambda = 25ns$.

El espaciamiento entre los elementos del arreglo de sensores no debe ser mayor a media longitud de onda para que no se generen lóbulos laterales.

$$d \leq \frac{\lambda}{2} \leq \frac{1500/1000000}{2} = 0.0007;$$

ecuación 10

En la ecuación 10 se ha utilizado la longitud de onda del agua, ya que ésta es menor que la del acero, y es el primer medio que atraviesa la onda de ultrasonido.

En la figura 20 se observa el arreglo de los piezoeléctricos y la forma del tubo de la simulación en 2D. El tubo tiene un diámetro de 12", 1cm de grosor con agua en su interior. El juego de piezoeléctricos se encuentra a 1cm de la pared interna del tubo.

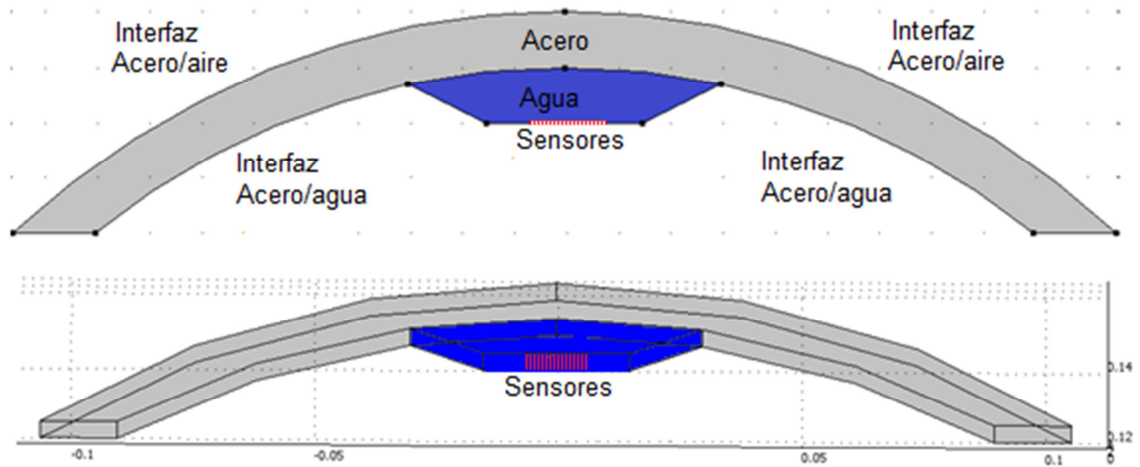


Figura 20. Sistema de la simulación en 2d y 3d. Fuente: autor.

Al extraer la imagen 2D de la figura 20 por 5mm obtenemos la representación en 3D. Las cargas puntuales se convierten en lineales como se observa en la figura 21.



Figura 21. Conversión de sensores puntuales a lineales. Fuente: autor.

Con este montaje se busca obtener los tiempos de llegada de los ecos causados por las interfaces agua/acero y acero/aire. Para determinar la intensidad de la reflexión de los ecos se calculan los coeficientes de reflexión y transmisión por las ecuaciones 11 y 12.

$$\text{Coeficiente de reflexión } R = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2 ;$$

ecuación 11

$$\text{Coeficiente de transmisión} = 1 - R ;$$

ecuación 12

El sonido se atenúa progresivamente, conforme se retira de la fuente sonora. Para cargas puntuales 6 dB cada vez que la distancia se duplica y en lineales 3 dB.

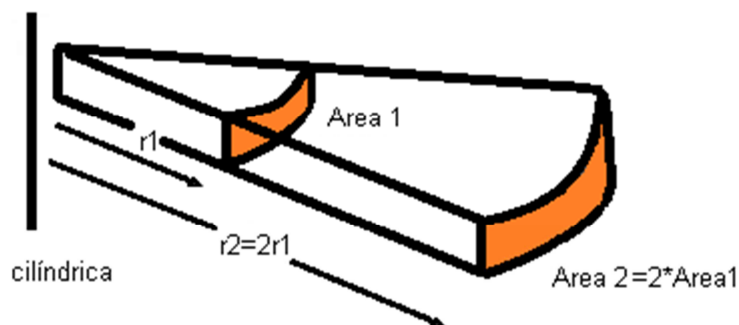


Figura 22. Flujo acústico de una carga cilíndrica. Fuente: autor.

La atenuación por la distancia en cargas lineales está dada por:

$$3dB * \left(\frac{r_2}{r_1}\right); \quad \text{ecuación 13}$$

La atenuación por la interface es:

$$10 * \log(R); \quad \text{ecuación 14}$$

4.3. Características del primer eco

La primera interfaz (agua/acero) está a 0,01m del piezoeléctrico, por lo tanto r_2 es la suma del camino de ida y de vuelta 0,02m. La distancia al punto del valor máximo de presión es r_1 0,001725m.

La atenuación por distancia es:

$$3dB * \left(\frac{0,02}{0,001725}\right); -34.78dB.$$

El tiempo de regreso de la señal al piezoeléctrico por la primera interfaz es:

$$t_1 = \frac{x_{\text{interfaz ida y vuelta}}}{c_{s \text{ agua}}} = \frac{(0,02)}{1500}; 1,333e-5s$$

El coeficiente de reflexión por la interfaz agua-acero es:

$$R = \left(\frac{(392e5 - 15e5)}{(392e5 + 15e5)}\right)^2 = 0,858.$$

La atenuación por la interfaz agua-acero es:

$$10 * \log(0,858) = -0,665dB,$$

La suma de las dos atenuaciones da como resultado la atenuación total del primer eco.

$$\text{Atenuación}_{\text{total eco } 0,02m} = \text{Atenuación}_{0,02m} + \text{Atenuación}_{\text{interfaz1}} = -34.78 - 0,665 = -35.445dB.$$

El coeficiente de transmisión es $1 - 0,858 = 0,142$, su atenuación es $-8,477dB$ en la señal que se transmite por la interfaz.

4.4. Características del segundo eco

La segunda interfaz (acero/aire) está a 0,02m del piezoeléctrico, por lo tanto r_2 es la suma del camino de ida y de vuelta 0,04m. La distancia al punto del valor máximo de presión es r_1 0,001725m.

La atenuación por distancia es:

$$3dB * \left(\frac{0,04}{0,001725}\right) = -69.564dB.$$

El coeficiente de reflexión por la interfaz acero-aire es:

$$R = \left(\frac{(428,75-15e5)}{(428,75+15e5)} \right)^2 = 0,998.$$

La atenuación por la interfaz acero/aire es:

$$10 * \log(0,98) = -0,0086\text{dB}.$$

La suma de las dos atenuaciones da como resultado la atenuación del segundo eco.

$$\begin{aligned} \text{Atenuación}_{total\ eco\ 0,04m} &= \text{Atenuación}_{0,04m} + \text{Atenuación}_{interfaz1} + \text{Atenuación}_{interfaz2} + \\ \text{Atenuación}_{interfaz1} &= -69.564-8,477-0,0086-8,477=-86.526\text{dB}. \end{aligned}$$

El tiempo de regreso del segundo eco es la suma de los tiempos de las dos interfaces:

$$t1 = \frac{x_{interfaz\ ida\ y\ vuelta}}{c_{s\ agua}}; t1 = \frac{(0,02)}{1500}; 1,333e-5s.$$

$$t2 = \frac{x_{interfaz\ ida\ y\ vuelta}}{c_{s\ acero}}; t2 = \frac{(0,02)}{5000}; 4e-6s.$$

$$t_{interfaz\ 2} = t1 + t2; 1,733e-5s.$$

El resultado de las atenuaciones de los dos ecos se muestra en la figura 23.

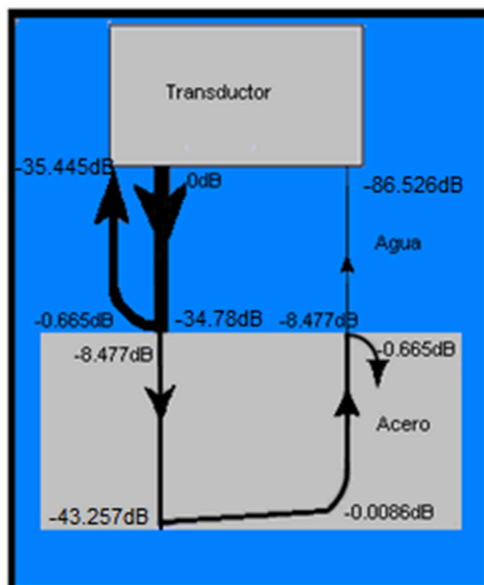


Figura 23. Atenuaciones por distancias e interfaces. Fuente: autor.

4.5. Sistema con solo un piezoeléctrico

En la primera simulación se utiliza solamente una arista como piezoeléctrico de emisión y recepción de los datos. Para determinar la atenuación y tiempos de llegada de los dos ecos, éstos se comparan con los calculados anteriormente. En la figura 24 se observa la configuración del sistema, con los parámetros de simulación especificados.

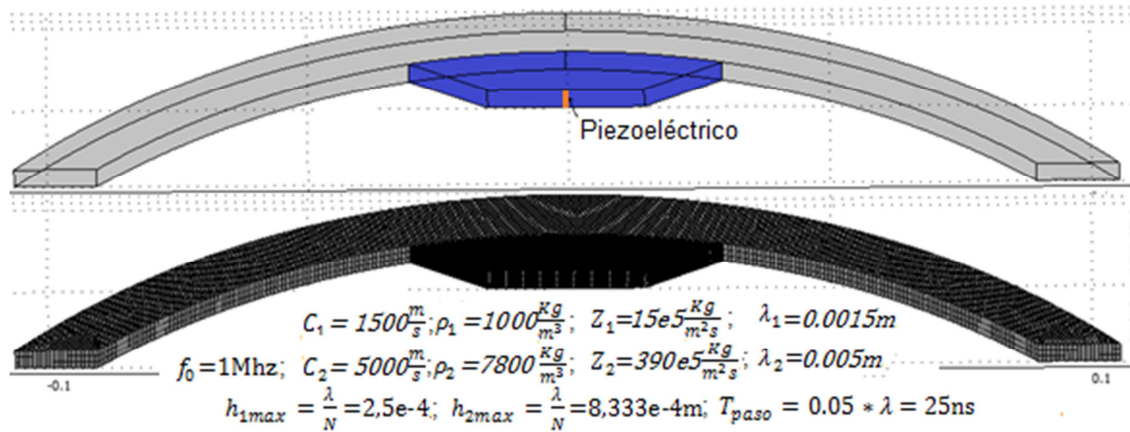


Figura 24. Simulación de un solo piezoeléctrico en el sistema de agua y tubería. Fuente: autor.

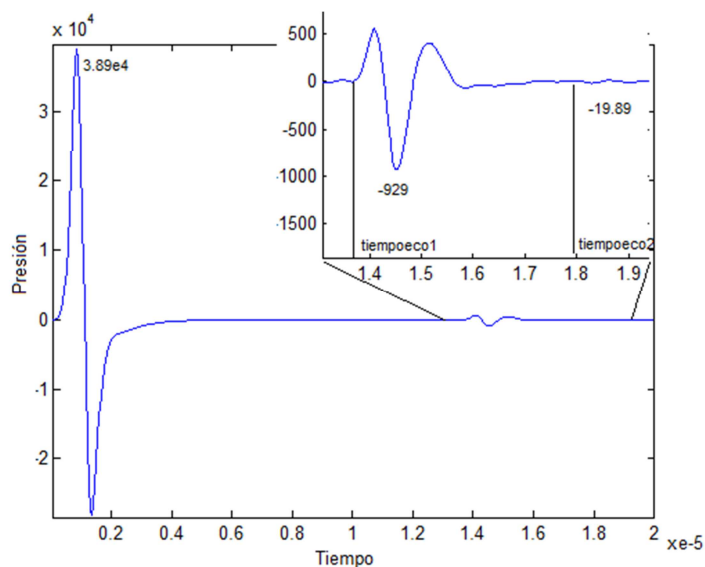


Figura 25. Señal obtenida de la simulación en Comsol 3,5 del sistema de la figura 24. Fuente: autor.

En la figura 25 no se observa el segundo eco hasta no amplificar la señal 20 veces. Se puede observar las amplitudes máximas de cada eco, las cuales son utilizadas para obtener su atenuación.

$$A_{\text{maxima señal excitación}} = 3,89e4$$

$$A_{\text{maxima primer eco}} = 929$$

$$A_{\text{maximasegundoeco}} = 19,89$$

$$Atenuación_{\text{primereco}} = 20 \log \frac{929}{3,89e4} = -32,4387 \text{ dB}$$

$$Atenuación_{\text{segundoeco}} = 20 \log \frac{19,89}{3,89e4} = -65,8263 \text{ dB}$$

La atenuación del primer eco es similar a la calculada anteriormente. El segundo eco difiere por 20 dB, debido a que la señal de este está superpuesta

a la del primer eco con ruido. La deformación del segundo eco puede deberse a la interferencia del primer eco.

Los tiempos son similares a los calculados:

$$t_{interfaz\ 1} = 1,37e-5s$$

$$t_{interfaz\ 2} = 1,78e-5s$$

4.6. Sistema con un arreglo de 20 piezoeléctricos

Se simula la configuración mostrada en la figura 26, la cual tiene 20 piezoeléctricos espaciados a 0,007m. El material del paralelepípedo es acero con 0,005m de alto y 0,02m de profundidad. Los contornos de impedancia son los mismos del material para evitar ecos. En la simulación de esta estructura se obtiene diferentes líneas de extrusión de un tamaño de 0,02m, desde el centro del arreglo de los 20 piezoeléctricos, en el punto (0,0,0) con los ángulos 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° y 90°.

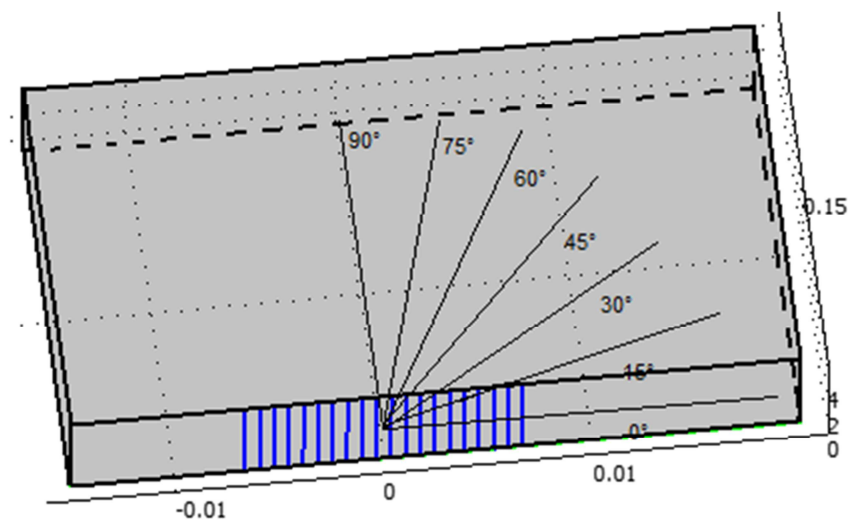


Figura 26. Configuración para determinar la directividad del arreglo de piezoeléctricos. Fuente: autor.

Mediante Matlab se procesan los datos obtenidos por el simulador de elementos finitos, mediante las líneas de extrusión mostradas en la figura 26.

Se utiliza el algoritmo del anexo B para obtener las gráficas de directividad del arreglo mostradas en la figura 27. Éstas están divididas en distancias en el eje axial de 0,002m, desde 0 hasta 0,02m.

Se observa en la figura 27 como el haz se vuelve más directivo en función de la distancia. Claramente tiene más presión en un ángulo de 90° en dirección perpendicular a la del arreglo de los piezoeléctricos.

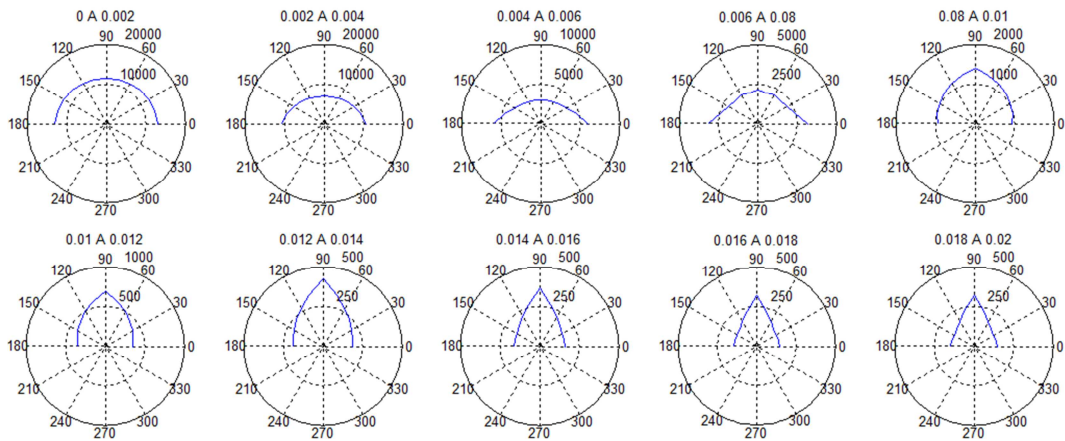


Figura 27. Directividad en función de la distancia axial. Fuente: autor.

Las figuras 28, 29 y 30, son el resultado de la simulación del sistema mostrado en la figura 20.

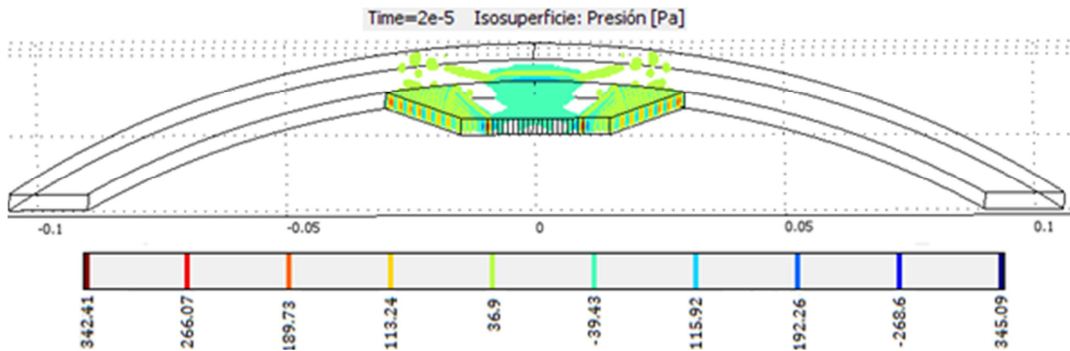


Figura 28. Gráfica del desplazamiento en el tubo de la señal de ultrasonido en isosuperficies. Fuente: autor.

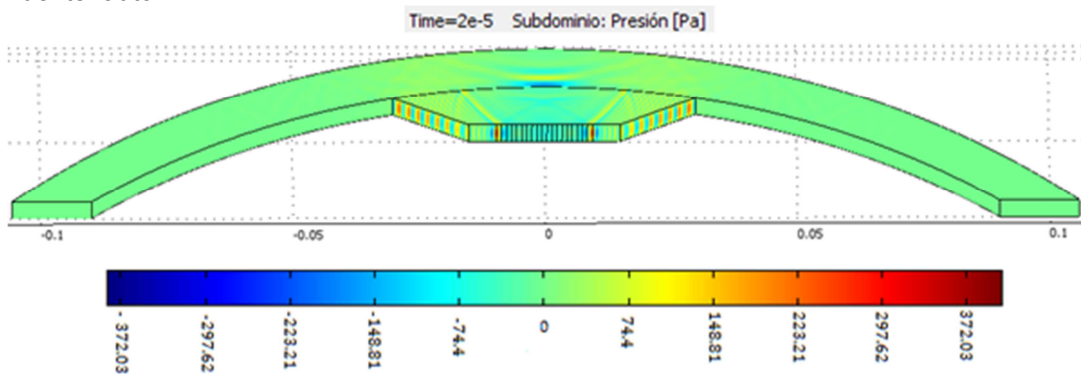


Figura 29. Gráfica del desplazamiento en el tubo de la señal de ultrasonido en contornos. Fuente: autor.

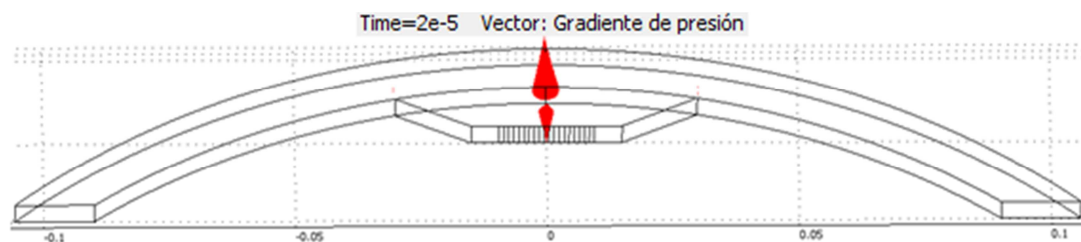


Figura 30. Gráfica del desplazamiento en el tubo de la señal de ultrasonido en gradientes. Fuente: autor.

La figura 31 muestra los ecos del frente de onda generado por la simulación del arreglo con los 20 piezoeléctricos puntuales. En esta figura se observa la disminución de la atenuación por el frente de onda generado. Con este arreglo se disminuye en la mitad la atenuación del primer eco comparado con el sistema con un solo piezoeléctrico. En el segundo eco se mejora la atenuación en 20dB.

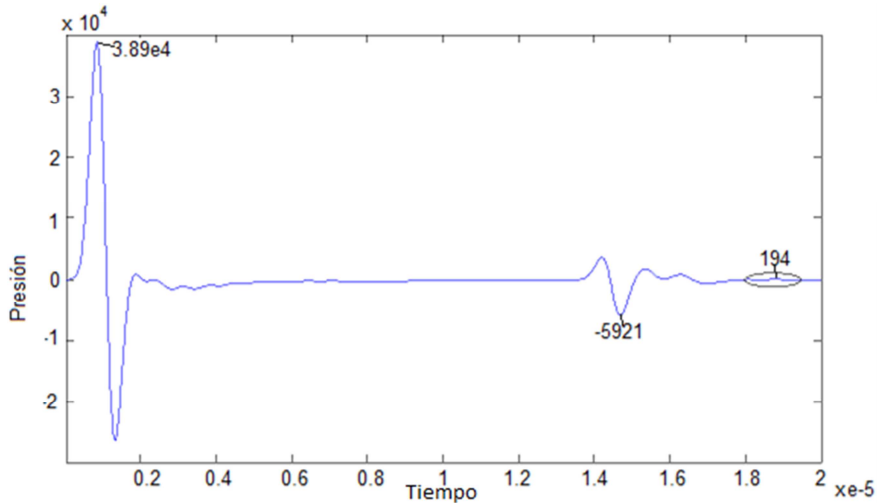


Figura 31. Señal de salida del arreglo de 20 piezoeléctricos. Fuente: autor.

$$A_{\text{maxima señal excitación}} = 3,89e4$$

$$A_{\text{maxima primer eco}} = 5921$$

$$A_{\text{maxima segundo eco}} = 194,4$$

$$Atenuación_{\text{primereco}} = 20 \log \frac{5921}{3,89e4} = -16,3511 \text{ dB}$$

$$Atenuación_{\text{segundoreco}} = 20 \log \frac{194,4}{3,89e4} = -46,0251 \text{ dB}$$

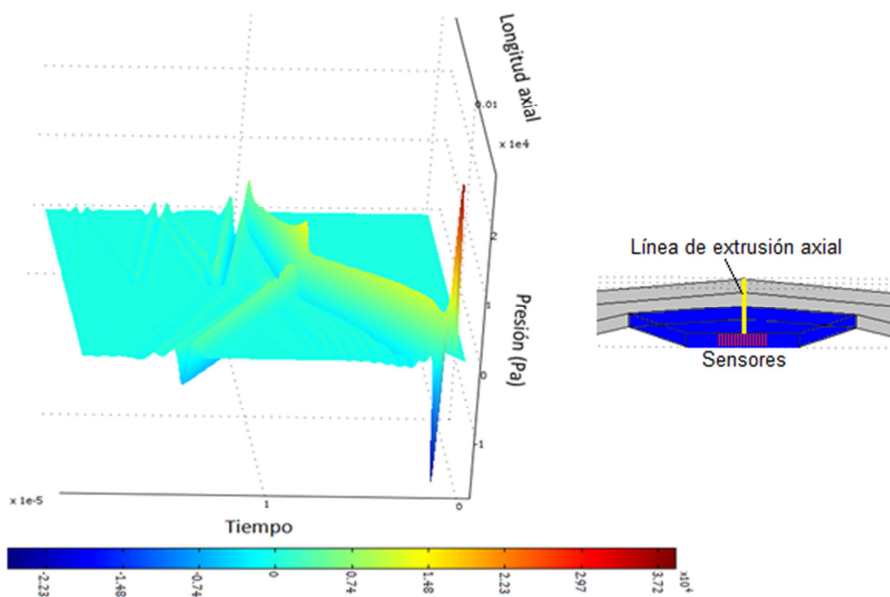


Figura 32. Gráfico de la sección transversal de la línea de extrusión axial. Fuente: autor.

En la figura 32 se observa la presión en función del tiempo y la longitud axial de una línea que va desde los sensores hasta la pared externa del tubo.

4.7. Sistema con un arreglo de 20 piezoeléctricos con foco

En un arreglo de sensores con foco como el mostrado en la figura 33, se busca que las señales de los piezoeléctricos lleguen al mismo tiempo al punto focal. Para esto cada sensor tiene un tiempo de activación dependiendo de su posición, siendo d la separación entre piezoeléctricos, N el número de piezoeléctricos en una fila de la matriz, D la distancia de cualquier piezoeléctrico al centro del arreglo, i el índice de la posición de los elementos de la fila, θ el ángulo que se forma entre la normal del centro de la fila y el punto focal, l_f la longitud focal y $l(i)$ la longitud de cualquier punto de la fila al punto focal.

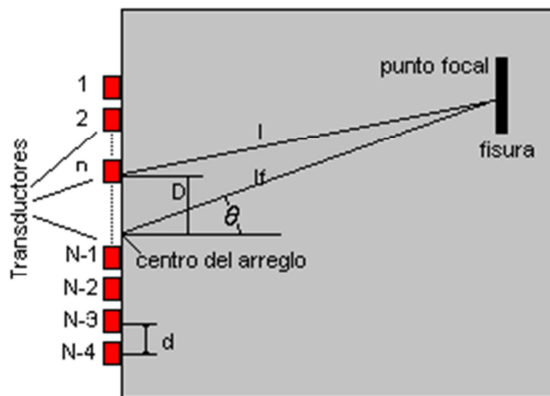


Figura 33. Configuración del arreglo para determinar el tiempo de salida de cada piezoeléctrico. Fuente: autor.

$D(i) = (i - \frac{N+1}{2})d$; Distancia de cualquier piezoeléctrico al centro de las filas.

$l(i) = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2}$; Longitud de cualquier punto de la fila al punto focal.

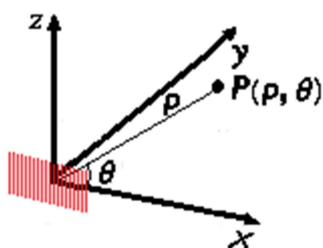


Figura 34. Coordenadas cilíndricas del arreglo de 20 piezoeléctricos. Fuente: autor.

Coordenadas cilíndricas:

$$x(l_f, \theta) = l_f \cos(\theta)$$

$$y(l_f, \theta) = l_f \sin(\theta)$$

$$z(l_f, \varphi) = 0$$

Longitud de cualquier piezoeléctrico al punto focal en coordenadas cilíndricas.

$$l(i) = \sqrt{(D(i) - l_f \cos(\theta))^2 + (l_f \sin(\theta))^2};$$

$$l(i) = \sqrt{D(i)^2 - 2l_f D(i) \cos(\theta) + l_f^2 \cos^2(\theta) + l_f^2 \sin^2(\theta)};$$

$$l(i) = \sqrt{D(i)^2 - 2l_f D(i) \cos(\theta) + l_f^2 (\cos^2(\theta) + \sin^2(\theta))};$$

$$l(i) = \sqrt{D(i)^2 - 2l_f D(i) \cos(\theta) + l_f^2};$$

$$t[i] = \frac{l_f - \sqrt{D(i)^2 - 2l_f D(i) \cos(\theta) + l_f^2}}{c} + t_0;$$

ecuación 15

El tiempo de activación del pulso de cada piezoeléctrico, para que lleguen todas las señales de ultrasonido al mismo tiempo en el punto focal, está determinado por la ecuación 15.

4.7.1. Arreglo de 20 piezoeléctricos con foco en ($l_f=4\text{cm}$ y $\theta = 90^\circ$)

Se utiliza el algoritmo del anexo C para obtener los tiempos de activación de cada piezoeléctrico.

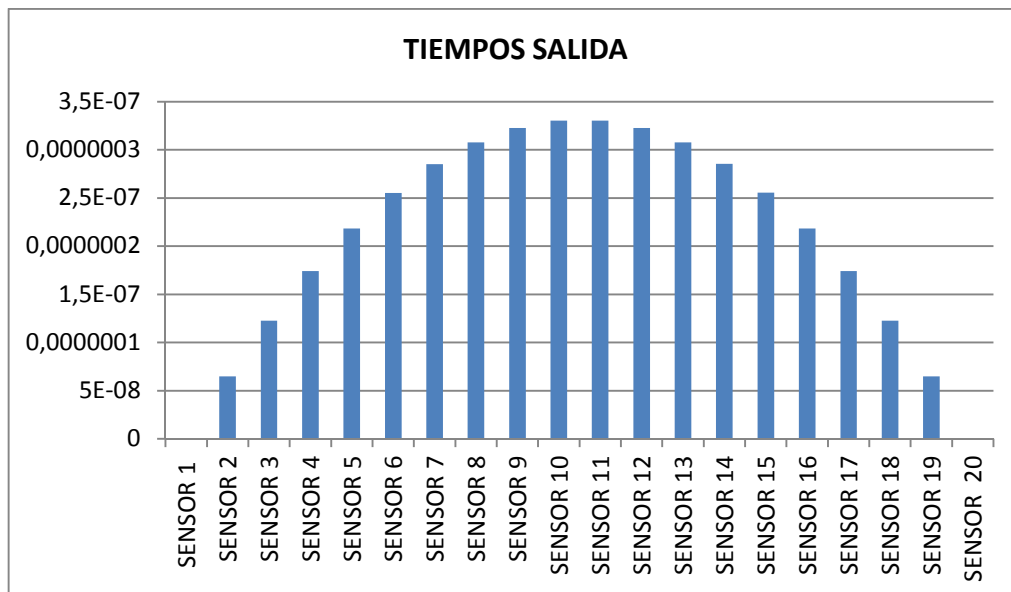


Figura 35. Valores de los tiempos necesarios para que la señal de cada piezoeléctrico llegue al mismo tiempo a 4cm. Fuente: autor.

Con los tiempos mostrados en la figura 35, se desfazan las señales de cada sensor en la simulación para obtener el frente de onda focalizado.

El resultado de la simulación es la gráfica de la señal de la figura 36, en la cual se observan los ecos de la pared interna y externa del tubo.

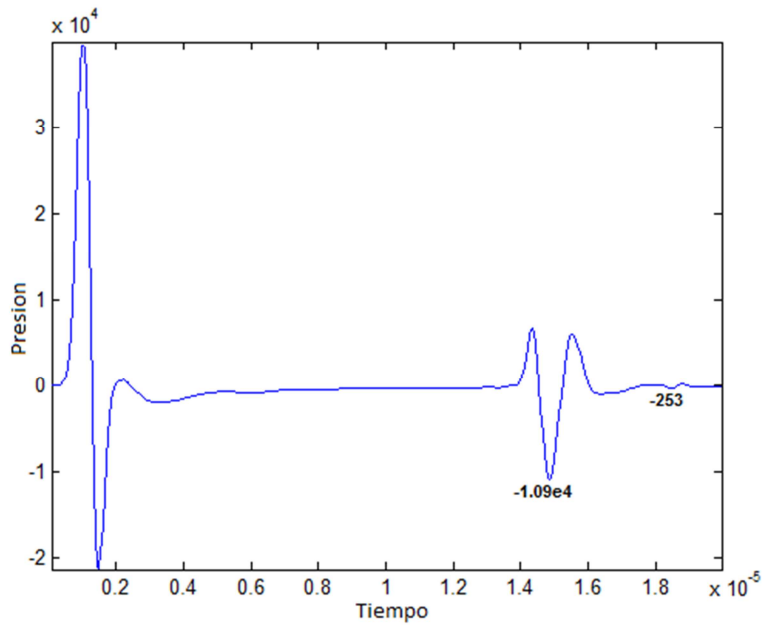


Figura 36. Señal obtenida de la simulación del sistema con foco en 4cm. Fuente: autor.

$$A_{\text{maxima señal excitación}} = 3,89e4$$

$$A_{\text{maxima primer eco}} = 1,09e4$$

$$A_{\text{maximasegundoeco}} = 253$$

$$Atenuación_{\text{primereco}} = 20 \log \frac{1,09e4}{3,89e4} = -11,05 \text{ dB}$$

$$Atenuación_{\text{segundoeco}} = 20 \log \frac{253}{3,89e4} = -43,7366 \text{ dB}$$

La atenuación disminuye en el primer y segundo eco en 5 y 3 dB respectivamente al compararla con el sistema de 20 piezoeléctricos sin foco.

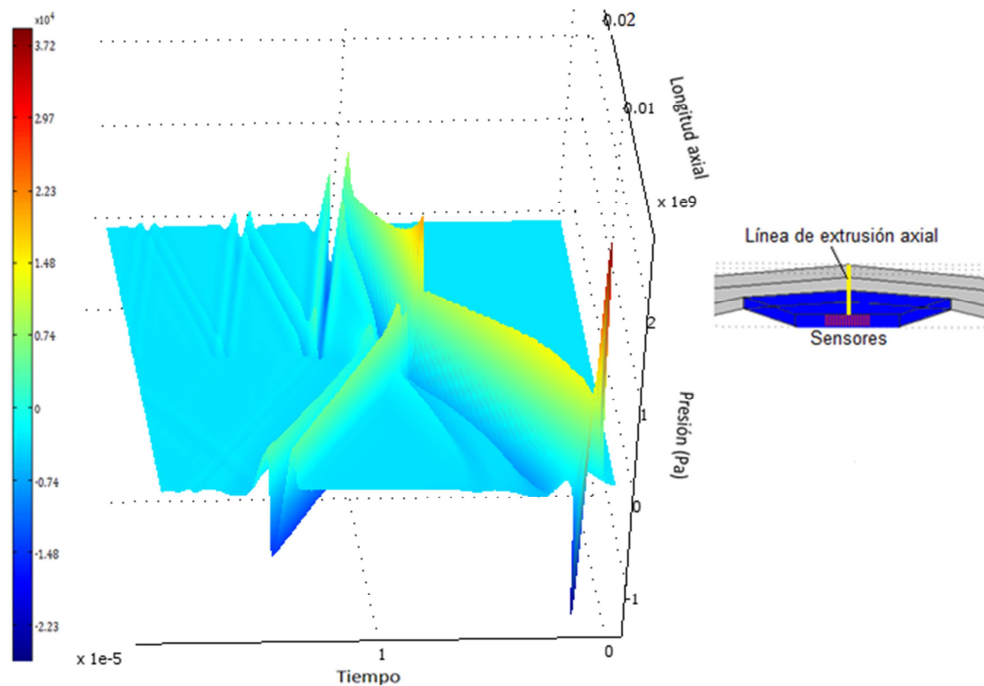


Figura 37. Grafica de la sección transversal de la línea de extrusión axial. Fuente: autor.

En la figura 37 se observa como el segundo eco es mucho más visible comparado con la gráfica de la línea de extrusión axial de los 20 sensores sin foco, en la cual no se aprecia este eco.

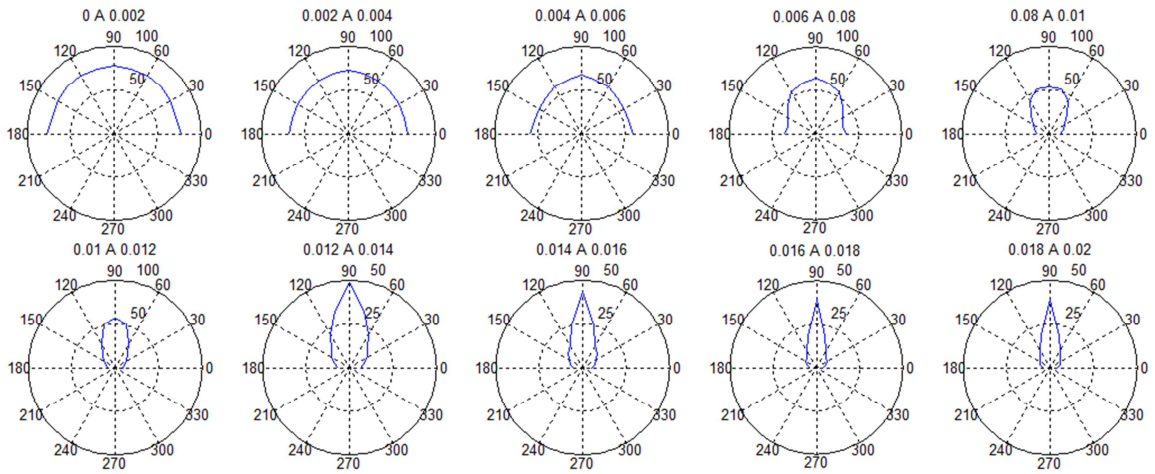


Figura 38. Directividad en función de la distancia axial. Fuente: autor.

El factor de directividad aumenta con el arreglo con foco, teniendo mejor directividad a una distancia axial entre 0.01cm a 0.02cm.

4.7.2. Arreglo de 20 piezoeléctricos con foco en ($l_f=2\text{cm}$ y $\theta = 90^\circ$)

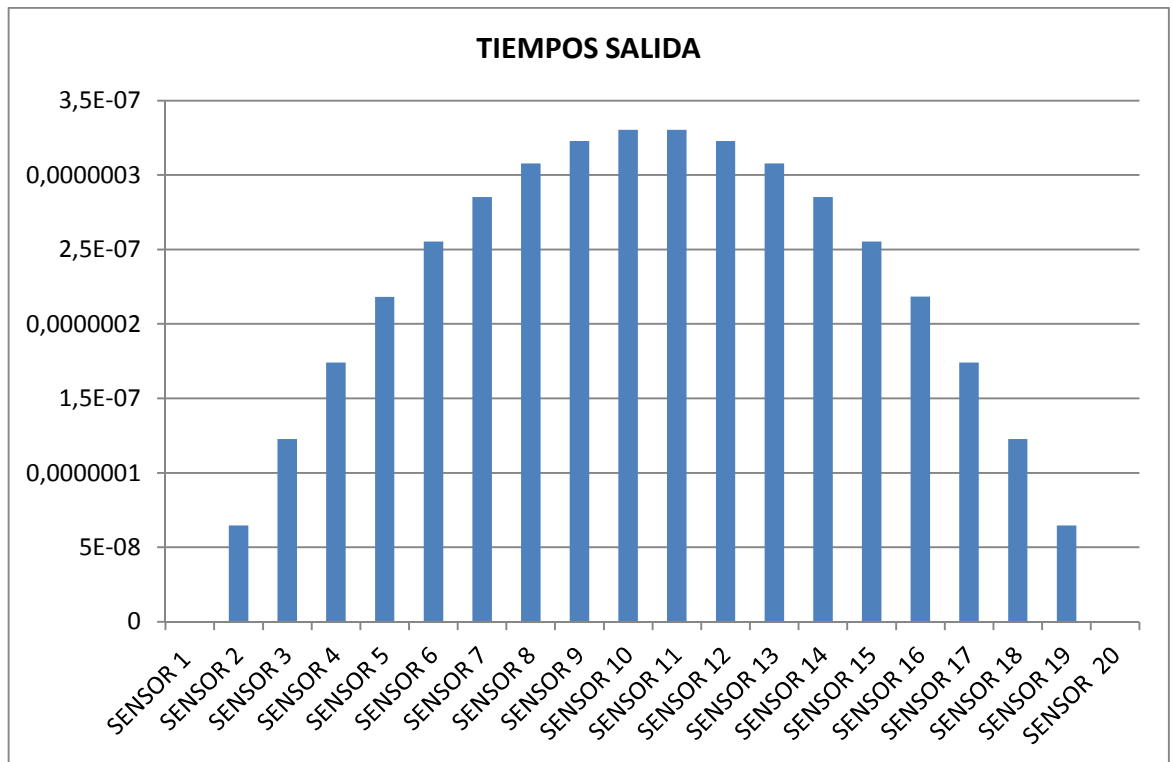


Figura 39. Valores de los tiempos necesarios para que la señal de cada piezoeléctrico llegue al mismo tiempo a 2cm. Fuente: autor.

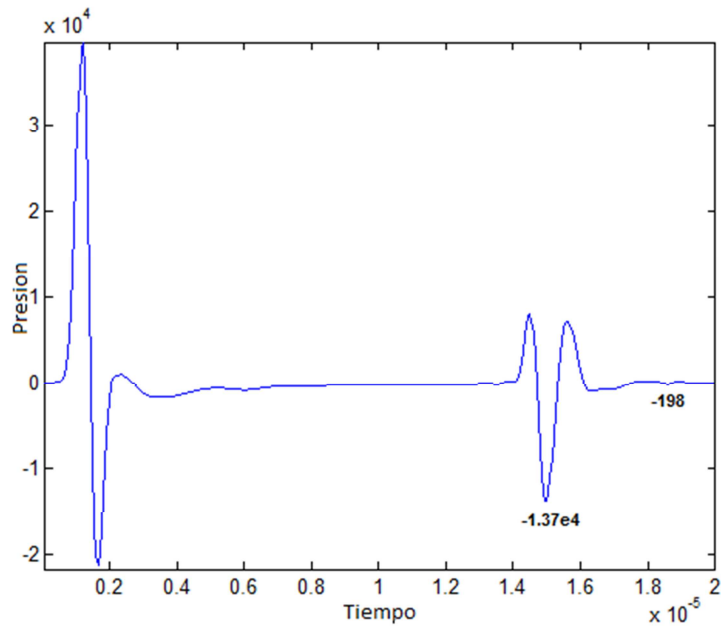


Figura 40. Señal obtenida de la simulación del sistema con foco en 2cm. Fuente: autor.

$$A_{\text{maxima señal excitación}} = 3,89e4$$

$$A_{\text{maxima primer eco}} = 1,37e4$$

$$A_{\text{maximasegundoeco}} = 198$$

$$Atenuación_{\text{primereco}} = 20 \log \frac{1,37e4}{3,89e4} = -9,0646 \text{ dB}$$

$$Atenuación_{\text{segundoeco}} = 20 \log \frac{198}{3,89e4} = -45,8657 \text{ dB}$$

Con el foco en 2cm se mejora la atenuación del primer eco. La atenuación del segundo eco no tiene mayor cambio en esta configuración.

La grafica 41 muestra la directividad del arreglo con foco en 2cm, en esta se observa el mejoramiento del factor de directividad comparada con la graficas de directividad del arreglo de los 20 piezoeléctricos con foco en 4cm y sin foco.

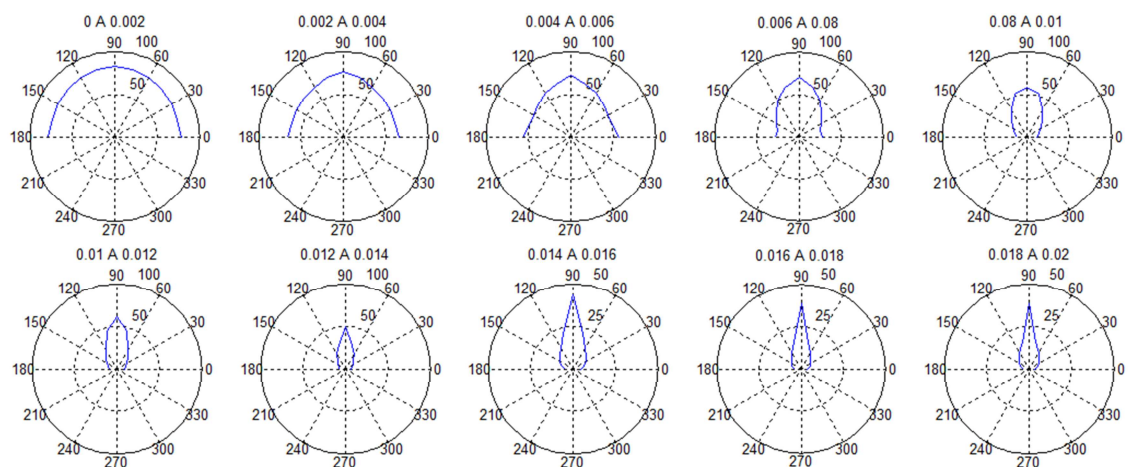


Figura 41. Directividad en función de la distancia axial. Fuente: autor.

4.8. Comparación de la atenuación de los arreglos

En la gráfica 42 se observa como la atenuación disminuye al aumentar el número de piezoeléctricos y al desfasar las señales para crear un foco.

En el sistema de simulación se tienen dos interfaces agua/acero (pared interna del tubo) y acero/aire (pared externa del tubo), las cuales están a 1cm y 2cm respectivamente de la distancia axial del sensor. Dado que la señal de ultrasonido hace un recorrido de eco de ida y vuelta, se escoge un foco de 2cm para disminuir la atenuación del primer eco y un foco de 4cm para disminuir la atenuación del segundo eco. Este comportamiento se puede observar en la gráfica 42.

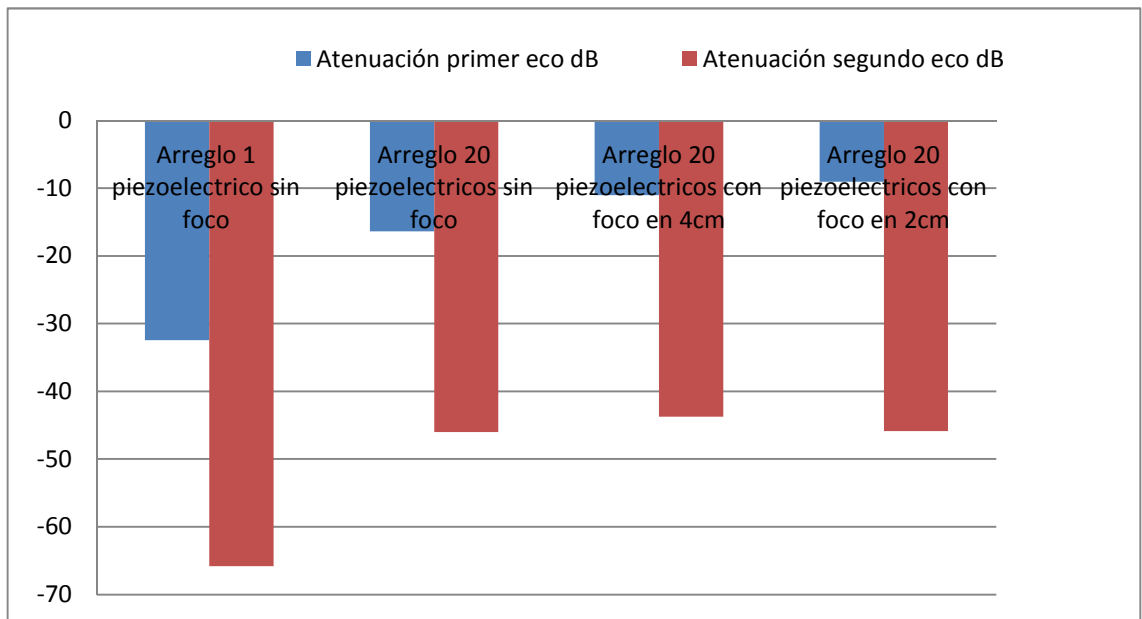


Figura 42. Comparación de la atenuación del primer y segundo eco de distintos arreglos. Fuente: autor.

5. EXTRACCIÓN DE RUIDO

5.1. Transformada wavelet

El análisis wavelet consiste en la descomposición de una señal en un conjunto jerárquico de aproximaciones y detalles.

La transformada wavelet sustituye las funciones bases de la transformada de Fourier (ondas sinusoidales) por una familia de ondas llamadas wavelets.

Tabla 2. Transformadas Wavelet discreta y continua.

Transformada Wavelet Continua	Transformada Wavelet Discreta
$C(a, b) = \int x(n) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$	$C(a, b) = \sum x[n] \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$
$a \in \mathbb{Z}^+ - \{0\}, b \in \mathbb{Z}$	$a = 2^j, b = k2^j; (j, k) \in \mathbb{Z}^2$

En la tabla 2, se observa la definición de la transformada wavelet continua y discreta. En esta última los niveles en la jerarquía corresponden a los de una escala diádica.

En la figura 43 se observa los factores a y b, los cuales determinan el escalamiento y la traslación respectivamente de la función madre $\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ de la transformada wavelet.

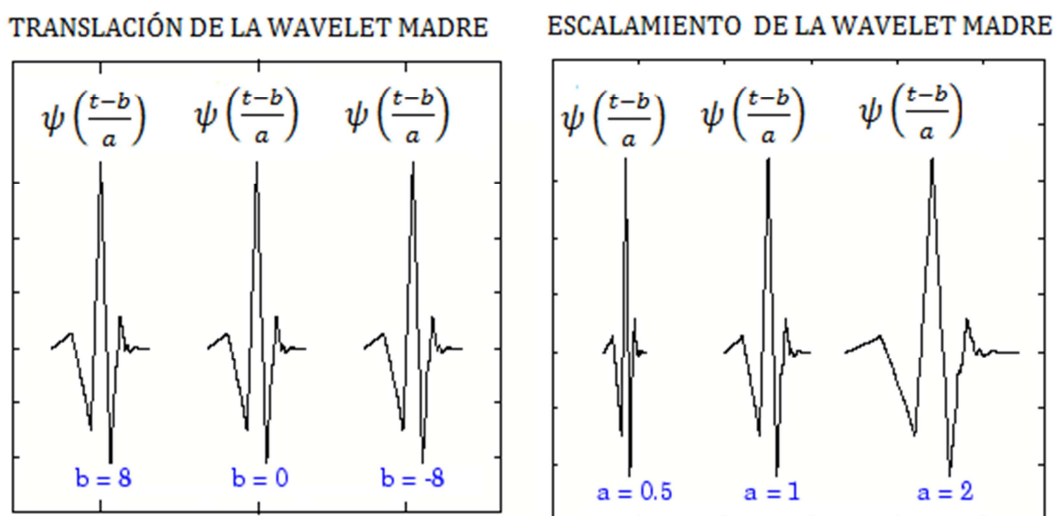


Figura 43. Traslación y escalonamiento de la wavelet madre. Fuente: autor.

En cada nivel j, se construye una aproximación A_j y un detalle D_j . Estas dos señales construidas están determinadas por filtros de bajas y altas frecuencias respectivamente. En la figura 44, se observa la jerarquía de la transformada discreta wavelet, en cada nivel se filtra la señal dividiendo la frecuencia y el número de datos en dos, como se observa en la figura 45.

En la salida de cada nivel se obtiene dos componentes de la señal: las de alta y baja frecuencia. La mayor cantidad de energía de una señal está en sus frecuencias bajas, las frecuencias altas pueden estar asociadas al ruido. En la

figura 44 se observa como en cada nivel j , se pierde el componente de detalle D_{j-1} .

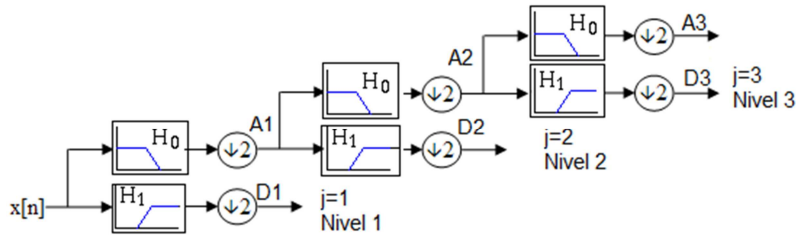


Figura 44. Descripción del procedimiento de la DWT. Fuente: autor.

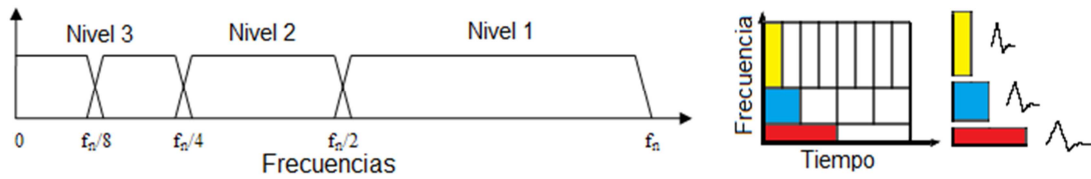
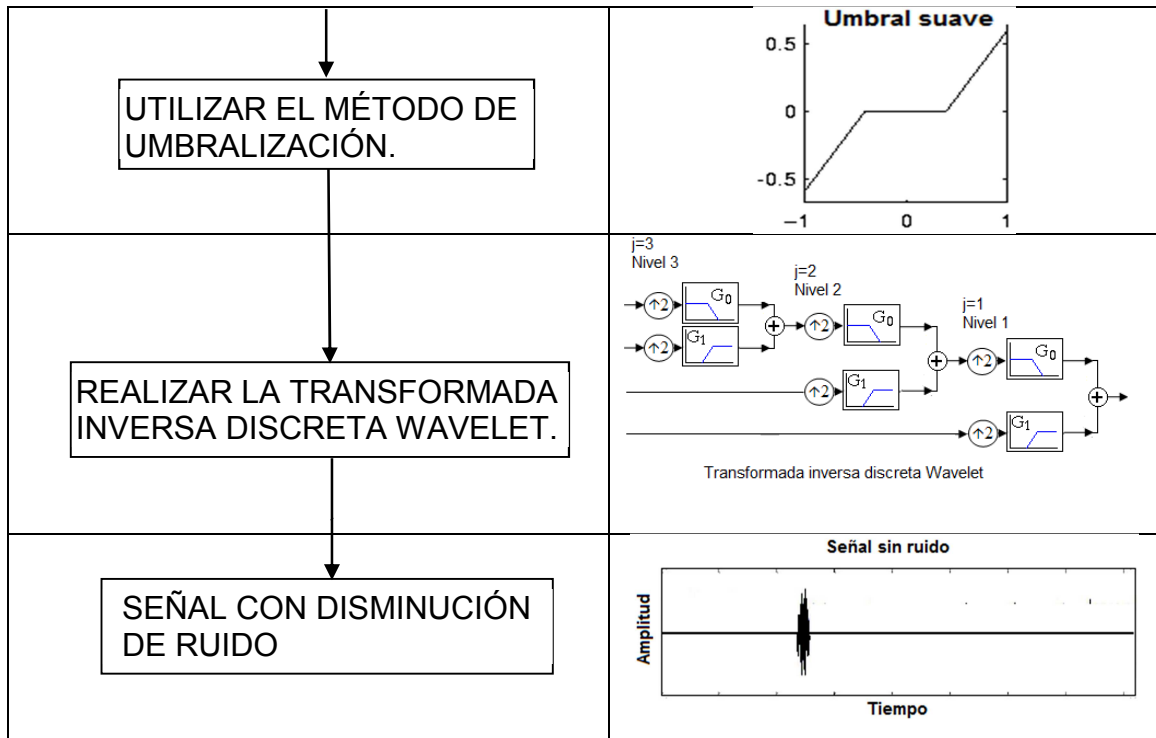


Figura 45. Descripción del procedimiento de la DWT. Fuente: autor.

Tabla 3. Pasos extracción de ruido. Fuente: autor.

<p style="text-align: center;">EXTRACCIÓN DE RUIDO</p>	<p style="text-align: center;">Señal con ruido</p>
<p style="text-align: center;">ESCOGER UNA WAVELET MADRE PARECIDA A LA SEÑAL A PROCESAR.</p>	<p style="text-align: center;">Funcion madre Wavelet Reverse Biorthogonal 3.7</p>
<p style="text-align: center;">REALIZAR LA TRANSFORMADA DISCRETA WAVELET PARA OBTENER LOS COEFICIENTES DE CADA NIVEL.</p>	<p style="text-align: center;">Transformada discreta Wavelet</p>
<p style="text-align: center;">UTILIZAR LA FUNCIÓN CURTOSIS EN LOS COEFICIENTES PARA ESCOGER EL NIVEL DE SALIDA.</p> <p style="text-align: center;">LLEVAR LOS DEMÁS COEFICIENTES A CERO.</p>	



En la tabla 3 se observan los pasos necesarios para la extracción del ruido de una señal, estos son aplicados a la señal obtenida de la simulación del sistema con los 20 piezoeléctricos.

Paso 1: Se comparan las distintas familias wavelet discretas con la señal de presión de excitación del piezoeléctrico hasta encontrar la más parecida. La escogida es la wavelet madre *rbio3,7* ('*Reverse Biorthogonal*'), esta se observa en la figura 46.

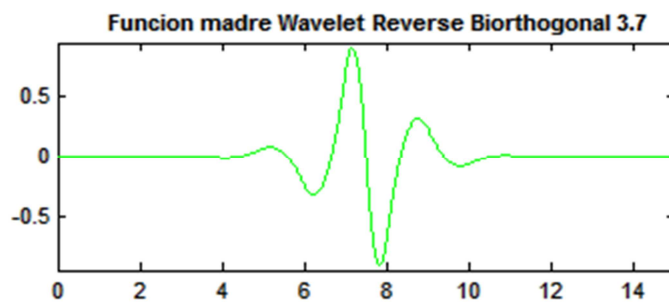


Figura 46. Señal madre wavelet escogida. Fuente: autor.

Paso 2: Se usa la DWT para descomponer la señal recibida obteniendo la matriz de coeficientes wavelet correspondientes a cada punto y escala.

Paso 3: Después de obtener los coeficientes wavelet se utiliza la función curtosis definida por la ecuación 16, la cual presenta valores más altos para las señales con la forma más afilada. El nivel con el mayor valor de curtosis es escogido en la reconstrucción de la señal, mientras el resto de coeficientes se eliminan figura 47.

$$(K) = E(y^4) - 3[E(y^2)]^2;$$

ecuación 16

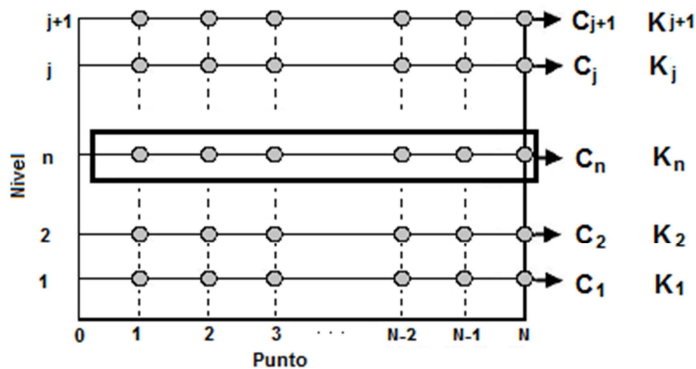


Figura 47. Selección del nivel de la DWT. Fuente: autor.

Paso 4: Los coeficientes todavía contienen los efectos del ruido, por lo tanto se utiliza el método de umbralización “minimaxi”, el cual genera un valor extremo de error mínimo de raíz cuadrática media (RMSE).

El valor del criterio de Minimaxi está dado por la ecuación 17.

$$\lambda = \sigma(0,3936 + 0,1829 \log x), x \geq 32;$$

$$\lambda = 0, x < 32$$

ecuación 17

Paso 5: La regla de umbral-suave, definida por la ecuación 18, permite determinar los coeficientes que tienen el valor más grande que el umbral λ . El resto de coeficientes se llevan a cero figura 48.

$$CDWT = \text{sign}(CDWT)(|CDWT| - \lambda), |CDWT| > \lambda;$$

$$CDWT = 0, |CDWT| < \lambda;$$

ecuación 18

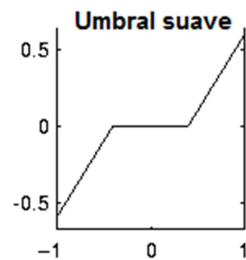


Figura 48. Método del umbral suave. Fuente: autor.

Paso 6: Utilizar los coeficientes obtenidos en la reconstrucción de la señal mediante la transformada inversa wavelet figura 49.

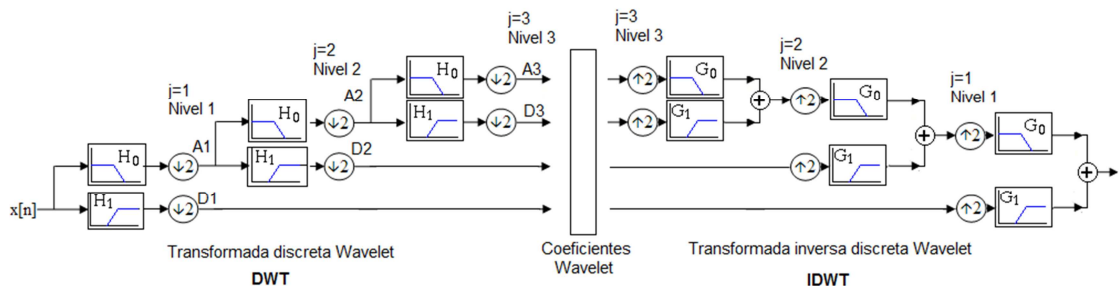


Figura 49. Transformada inversa discreta wavelet. Fuente: autor.

El código de los 6 pasos para extraer el ruido de la señal se encuentra en el anexo D.

5.2. Extracción de ruido de la señal simulada

Las 2 mayores contribuciones de ruido provienen del ensamble piezoeléctrico/cable y el amplificador de la señal. El límite de la lectura de la señal está determinado por su cantidad de ruido.

A la señal obtenida de la simulación se le adiciona ruido gaussiano determinado por la ecuación 19.

$$y_{con\ ruido} = y + \sqrt{Potencia\ del\ ruido} * randn; \quad \text{ecuación 19}$$

La SNR escalar especifica la relación señal-ruido en dB.

$$SNR = 20Log \frac{S}{N}; \quad \text{ecuación 20}$$

Se utilizaron diferentes valores de SNR disminuyéndola hasta encontrar el valor donde los 6 pasos de extracción de ruido por la transformada discreta Wavelet(DWT) pudiesen encontrar el segundo eco, el cual es el de menor energía como se observa en la figura 50.

Se adiciona a la señal un ruido gaussiano con un SNR de: 40dB, 35dB y 30dB, como se observa en las figuras 51-53, se escoge como límite la SNR de 40dB ya que a menor SNR la señal del segundo eco no es reconstruible.

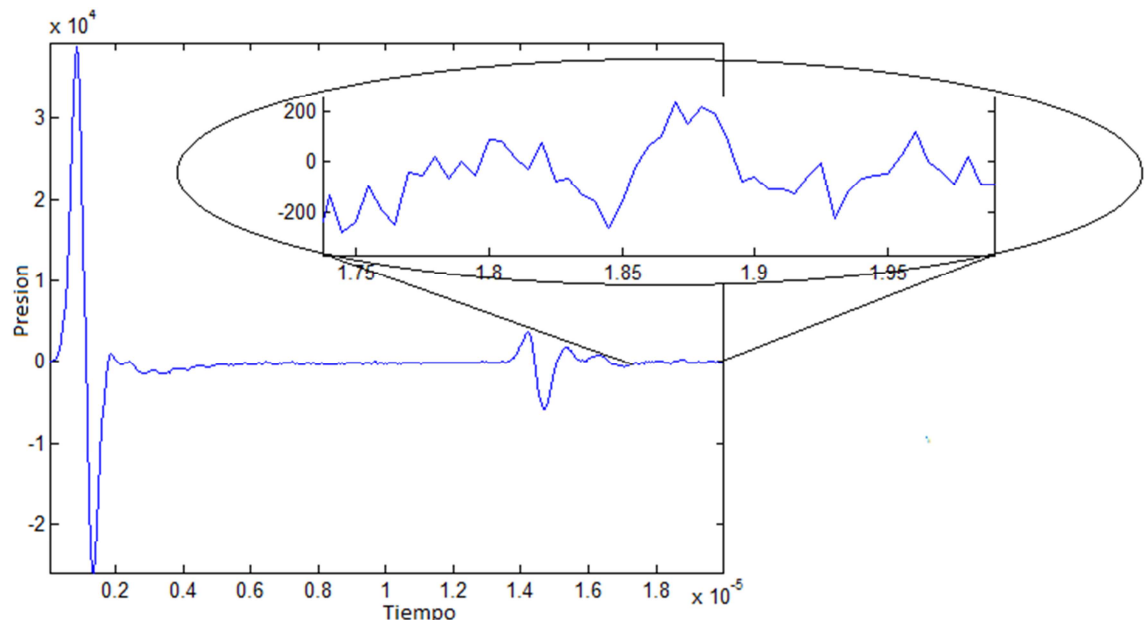


Figura 50. Señal de entrada con ruido gaussiano con detalle del segundo eco. Fuente: autor.

La potencia de la señal de entrada está dada por la ecuación 21.

$$Potencia = \frac{1}{T} \int_0^T |x(t)|^2 dt; \quad \text{ecuación 21}$$

La potencia del ruido generado está dada por la ecuación 22.

$$Potencia_{\text{ruido}} = Potencia_{\text{señal}} / SNR;$$

ecuación 22

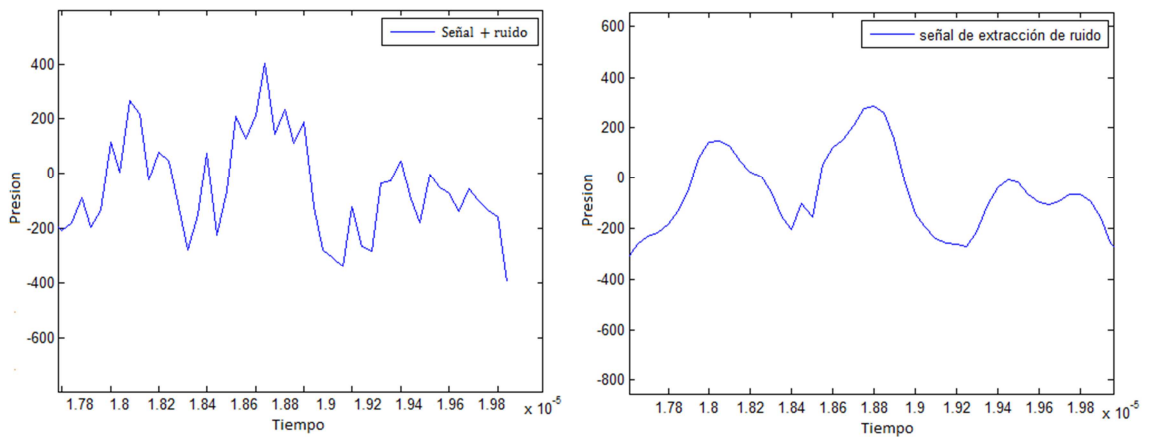


Figura 51. Segundo eco con un SNR de 40dB y la reconstrucción de la señal por DWT. Fuente: autor.

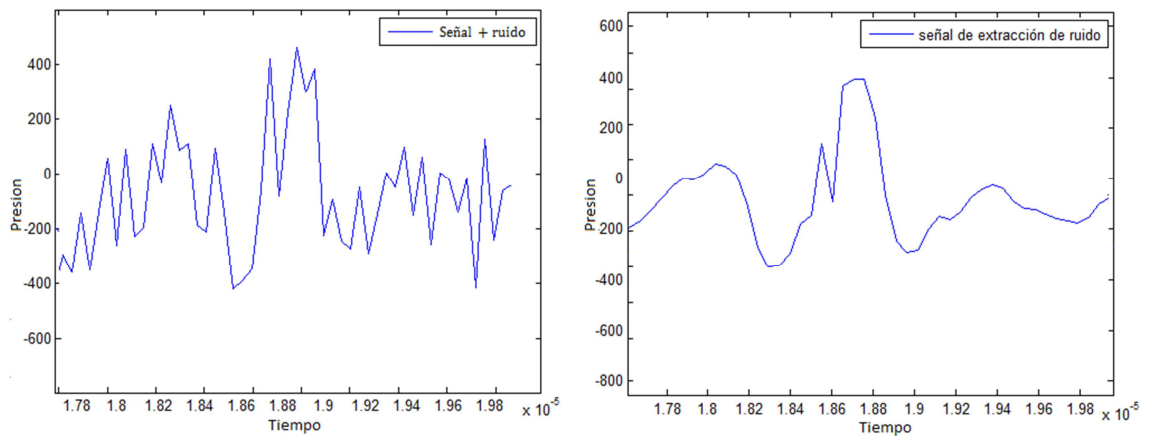


Figura 52. Segundo eco con un SNR de 35dB y la reconstrucción de la señal por DWT, Fuente: autor.

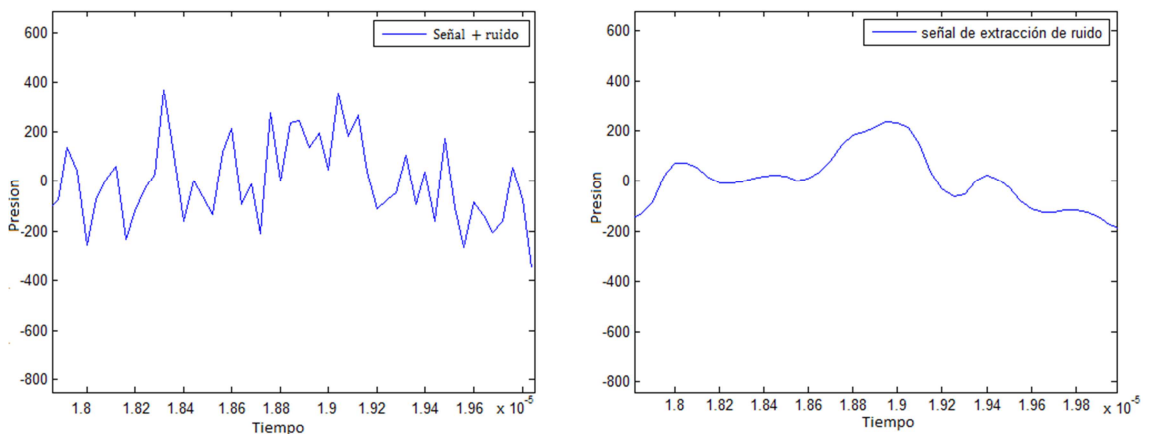


Figura 53. Segundo eco con un SNR de 30dB y la reconstrucción de la señal por DWT. Fuente: autor.

Según la sensibilidad del piezoeléctrico TC3027 mostrada en la tabla 1, al excitarlo con diferentes voltajes, se obtiene la relación de la potencia del ruido

con la potencia de la señal, como se observa en la tabla 4. La relación señal a ruido es de 40dB.

Tabla 4. Relación voltaje de entrada con la potencia de la señal y el ruido, con un SNR de 40dB.

Voltaje entrada	Potencia de la señal	Potencia del ruido
120	3,2293e7	3,2293e5
240	1,2917e8	1,2917e6
360	2,9064e8	2,9064e6
480	5,1669e8	5,1669e6

Como se observa en la figura 54 a mayor voltaje de excitación se tolera mayor potencia de ruido en el sistema. La SNR no cambia.

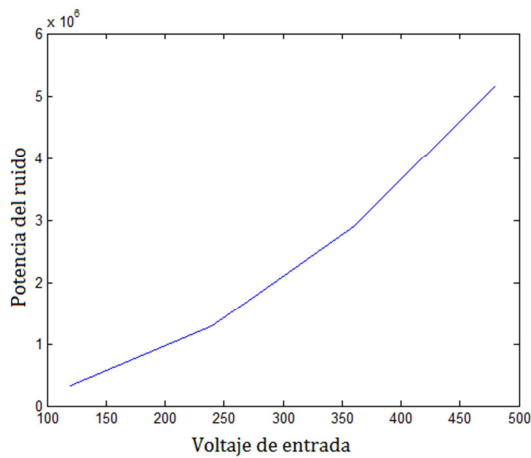
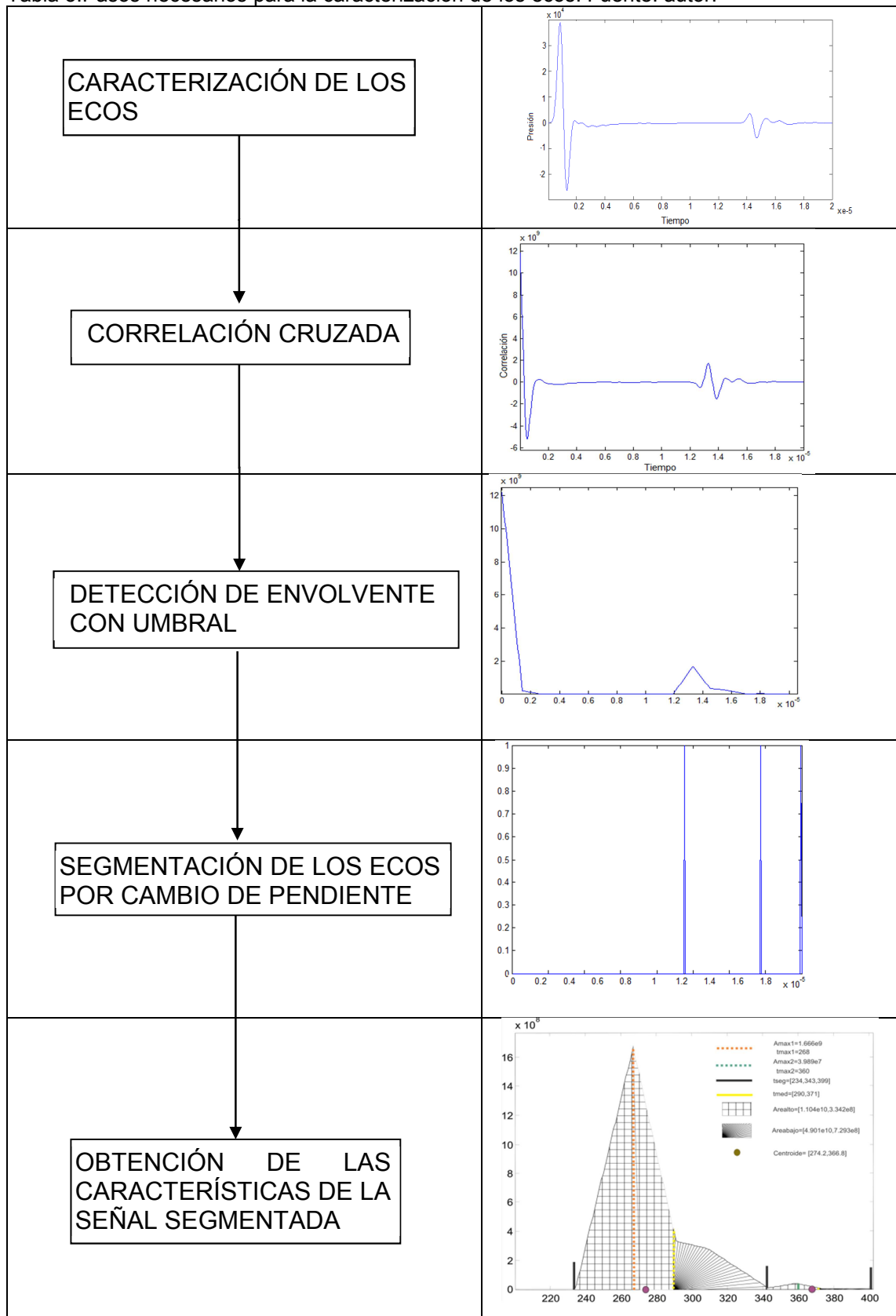


Figura 54. Potencia de ruido permitida en función del voltaje de entrada con un SNR de 40dB. Fuente: autor.

6. CARACTERIZACIÓN DE LOS ECOS

Tabla 5. Pasos necesarios para la caracterización de los ecos. Fuente: autor.



Después de disminuir el ruido en la señal con la DWT, se procede a caracterizar los ecos, para lo cual se siguen los pasos mostrados en la tabla 5.

Paso 1: El análisis de correlación cruzada se usa en la medición de coherencia entre señales. Los picos resultan de la correlación cruzada entre la señal de llegada de los ecos y la señal de caracterización de eco se utilizan para estimar el tiempo de vuelo entre ellas.

$$R = \int_{-\infty}^{\infty} \text{señal sensor}(\tau) * \text{señal excitación}(\tau - t) d\tau; \quad \text{ecuación 23}$$

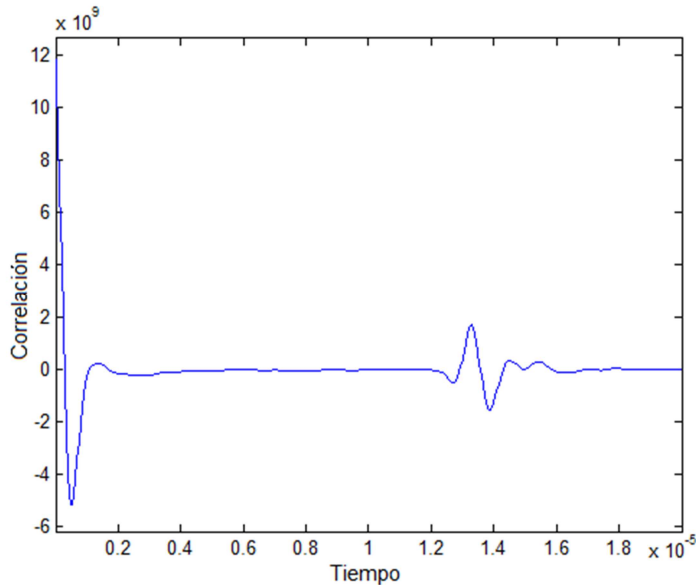


Figura 55. Correlación cruzada entre la señal del piezoeléctrico y la señal de excitación. Fuente: autor.

Paso 2: Se realiza la detección de envolvente eliminando la parte negativa de la señal de la figura 55. Luego se umbraliza hasta remover cualquier contribución que no sea de los ecos figura 56.

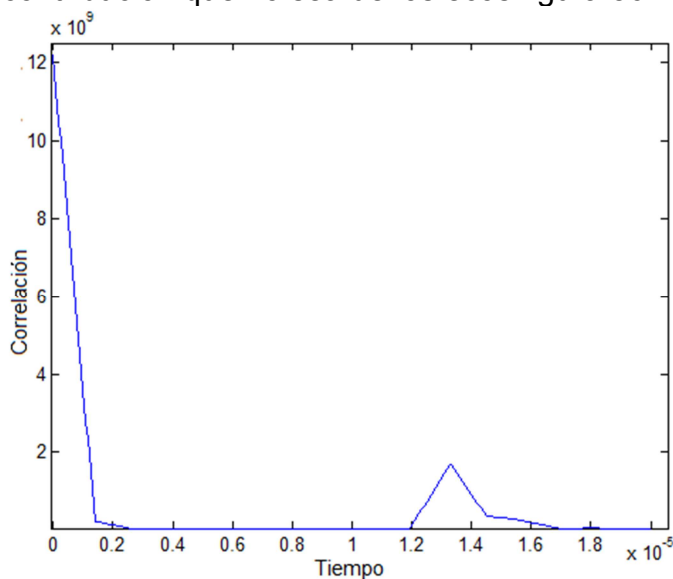


Figura 56. Detección de envolvente y umbralización. Fuente: autor.

Paso 3: Cuando comienza un eco hay un cambio de pendiente de negativa a positiva, este cambio determina el tiempo de segmentación de cada eco, figura 57.

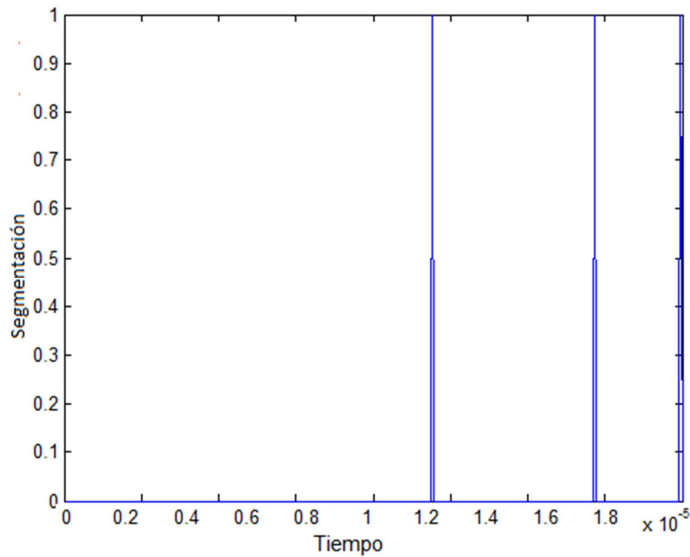


Figura 57. Segmentación de los ecos. Fuente: autor.

Paso 4: Obtención de las características de la señal segmentada para su clasificación. Como se observa en la figura 58, se obtienen las propiedades de los ecos de las dos interfaces.

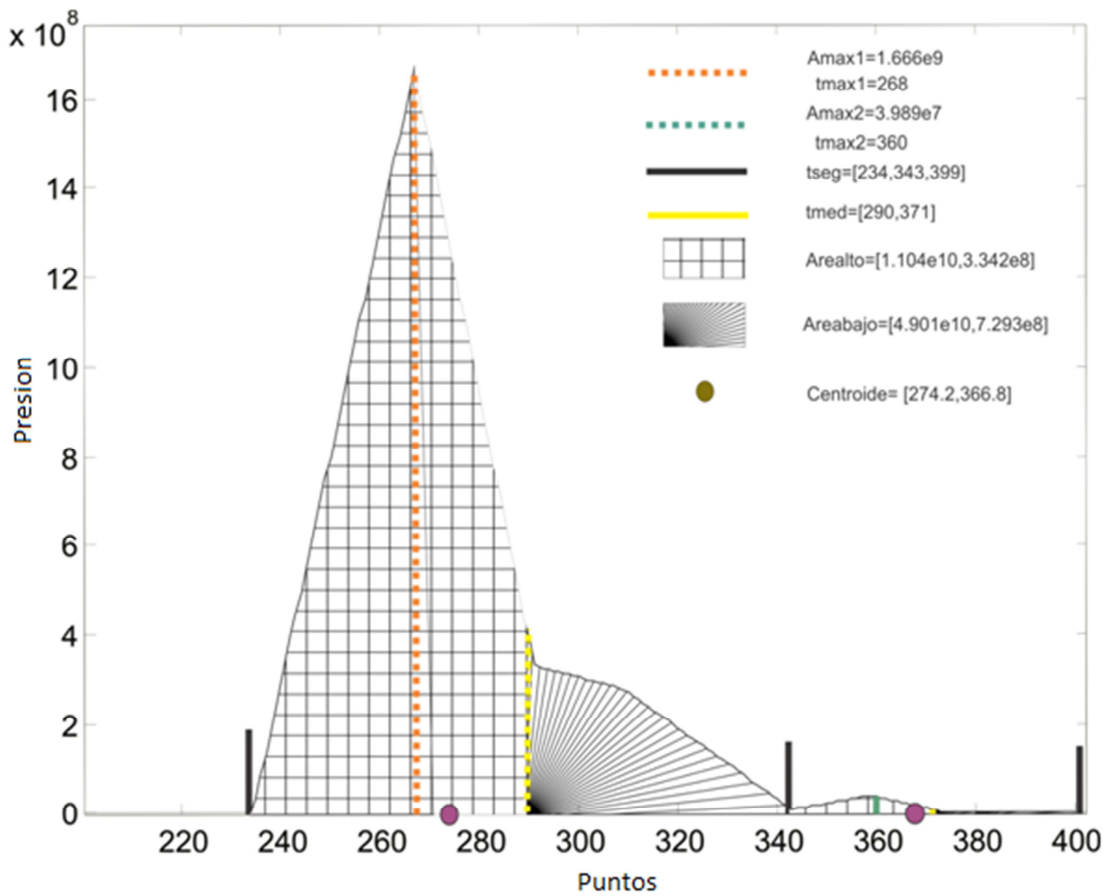


Figura 58. Caracterización de los ecos. Fuente: autor.

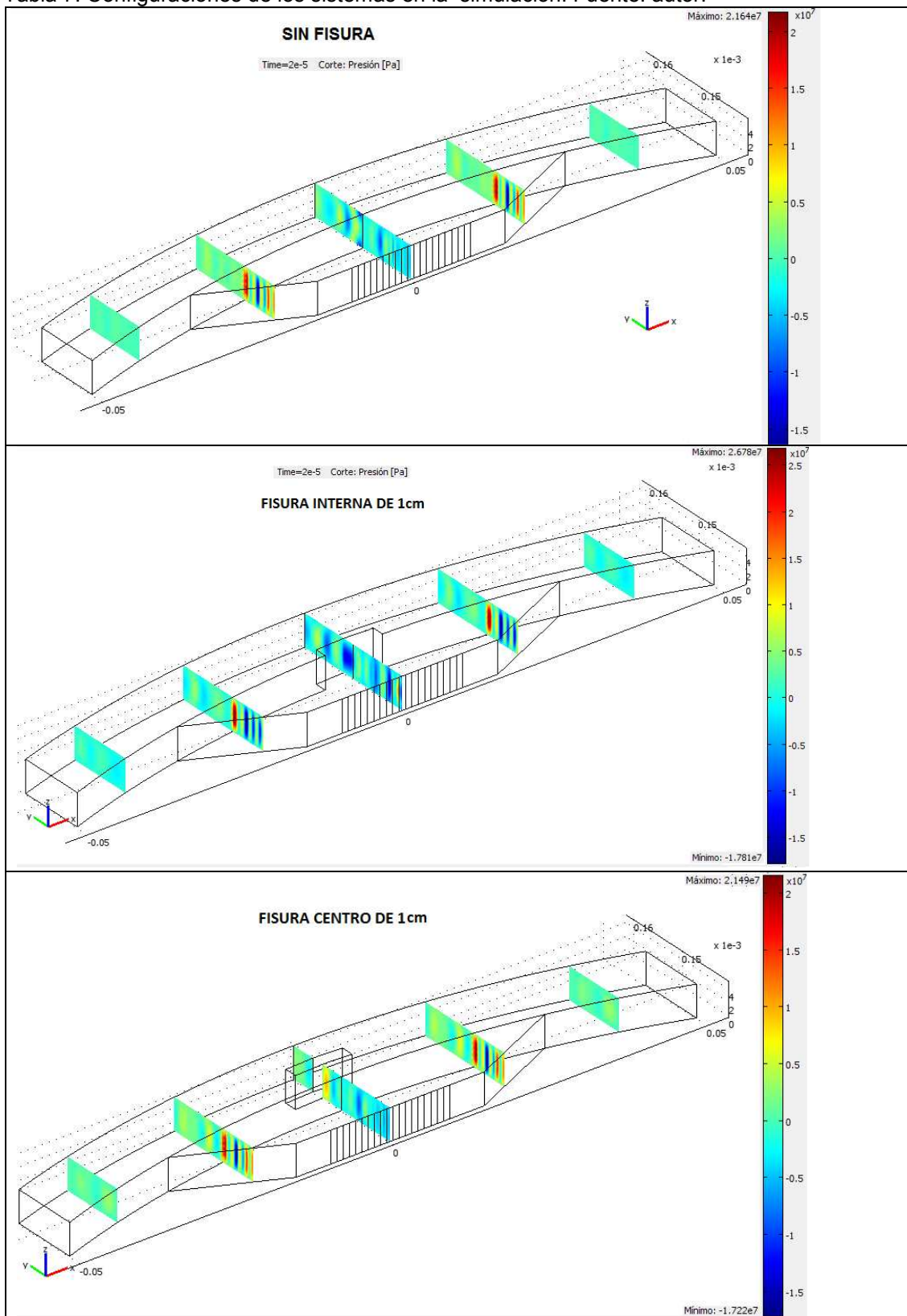
Tabla 6. Nombre y significado de las características. Fuente: autor.

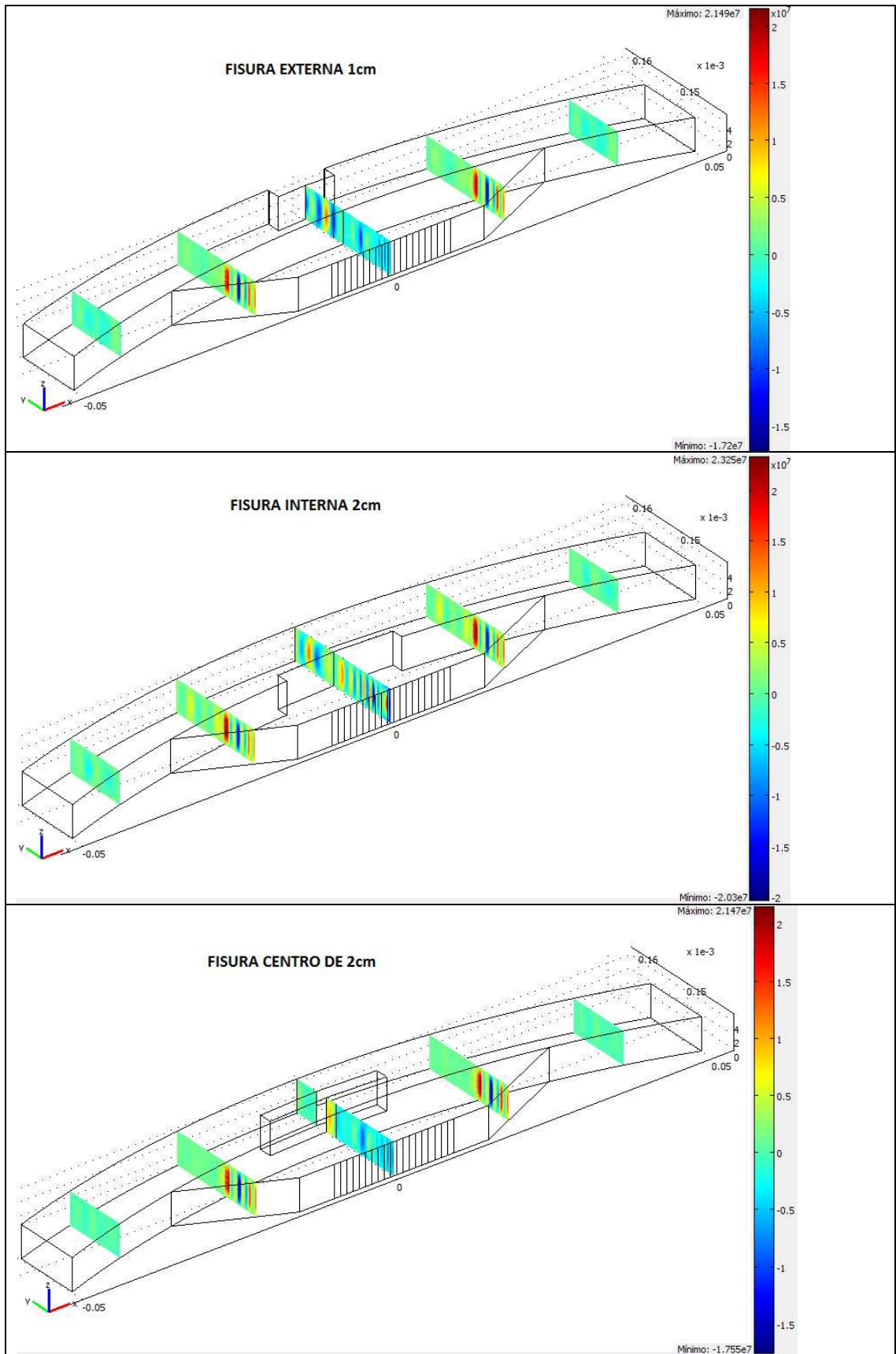
Nombre característica	Significado
Ampmax1	Amplitud máximo local primer eco.
Areamedalto1	Área entre el primer tiempo de segmentado y el tiempo medio.
Areamedbajo1	Área entre el tiempo intermedio y el segundo tiempo de segmentado.
Centroidealto1	Centro de masa de Areamedalto1.
Centroidebajo1	Centro de masa de Areamedbajo1
Tsegmentado1	Tiempo de segmentación primer eco.
Tampmax1	Tiempo máximo local primer eco.
tmedio1	Tiempo medio entre segmentación primer eco.
Ampmax2	Amplitud máximo local segundo eco.
Areamedalto2 medio.	Área entre el primer tiempo de segmentado y el tiempo
Areamedbajo2	Área entre el tiempo intermedio y el segundo tiempo de segmentado.
Centroidealto2	Centro de masa de Areamedalto2.
Centroidebajo2	Centro de masa de Areamedbajo2.
Tsegmentado2	Tiempo de segmentación segundo eco.
Tampmax2	Tiempo máximo local segundo eco.
tmedio2	Tiempo medio entre segmentación primer eco.

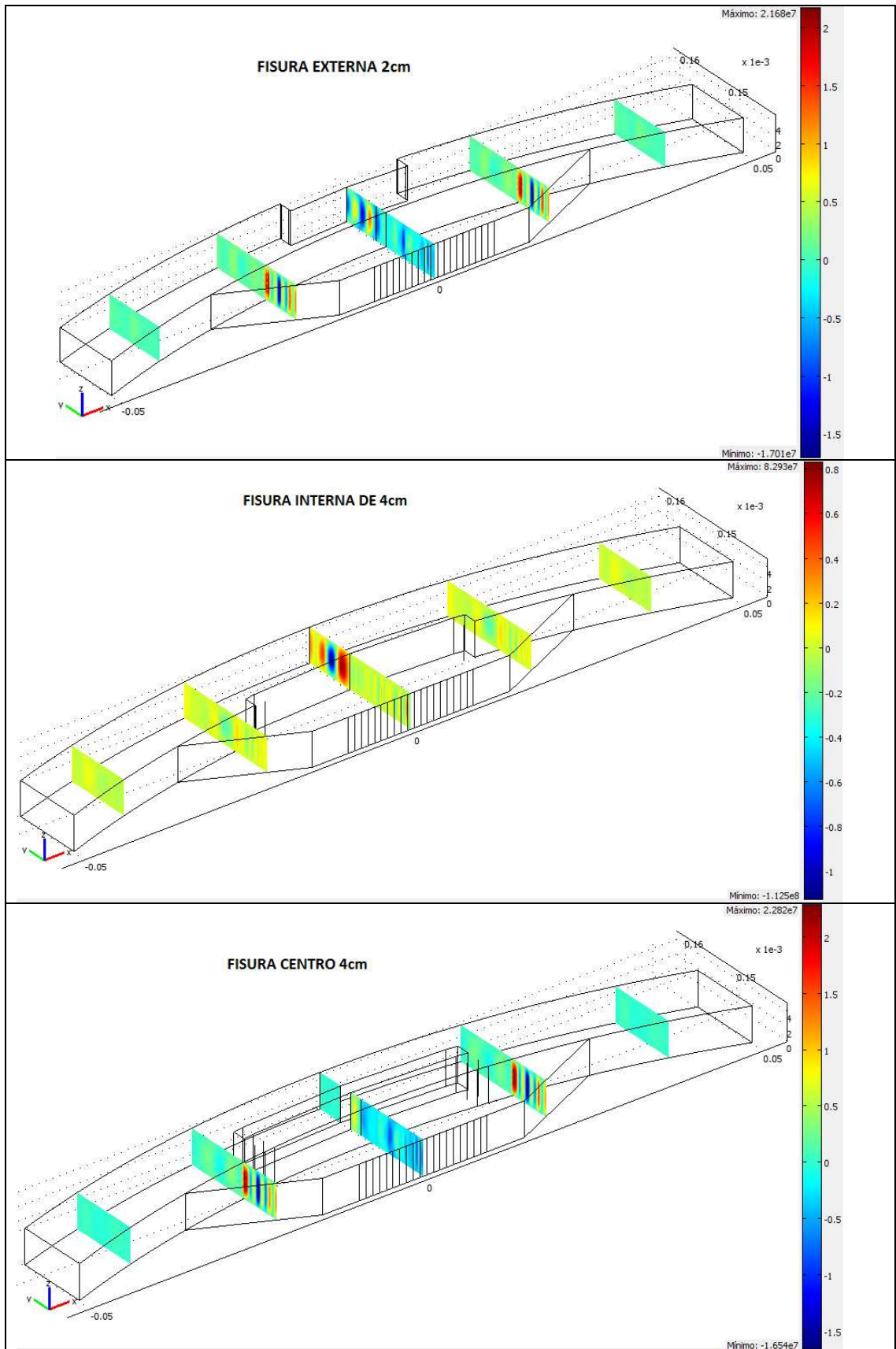
El código de los 4 pasos para extraer las características de los ecos se encuentra en el anexo E.

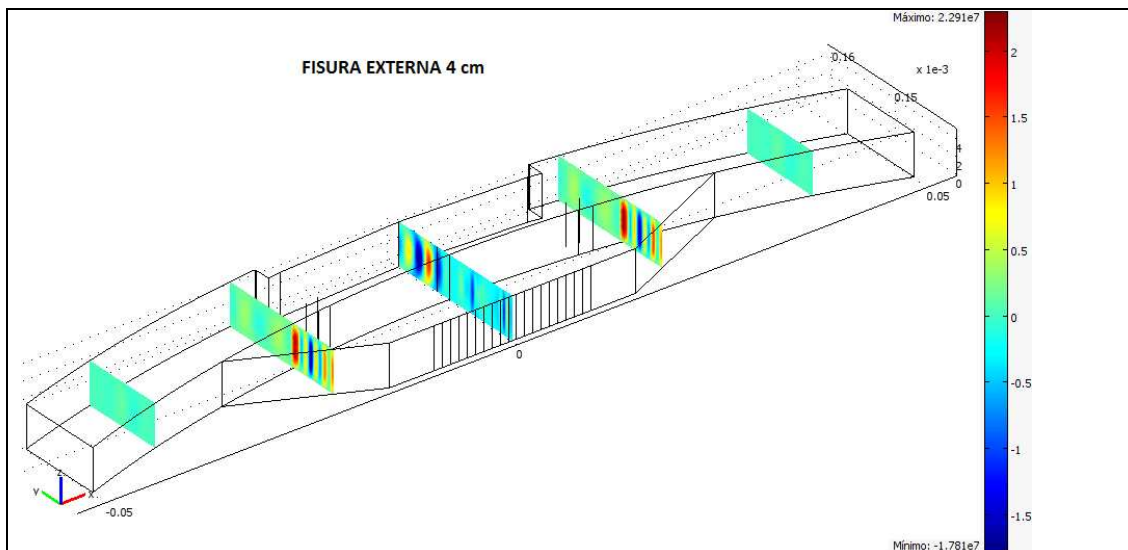
7. CLASIFICACIÓN DE LOS ECOS

Tabla 7. Configuraciones de los sistemas en la simulación. Fuente: autor.









Las gráficas mostradas en la tabla 7 representan las configuraciones analizadas en las cuales varía la distancia axial y tamaño de la fisura. En la parte inferior de cada sistema se observa la vista superior, en la cual el arreglo de 20 piezoeléctricos puntuales representa un solo sensor. Las señales resultantes de las simulaciones de estos sistemas son utilizadas en la clasificación de los ecos resultantes.

La clasificación de los ecos de la señal recibida está basada en la interpretación de los términos de la caracterización de los ecos los cuales son los mostrados en la figura 59.

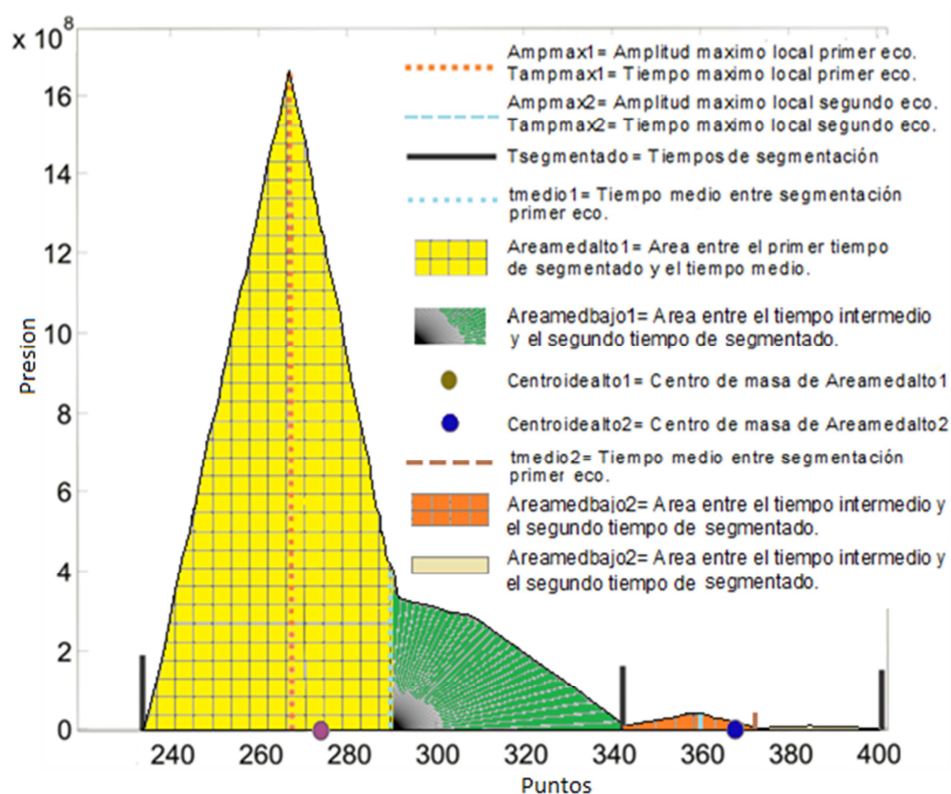


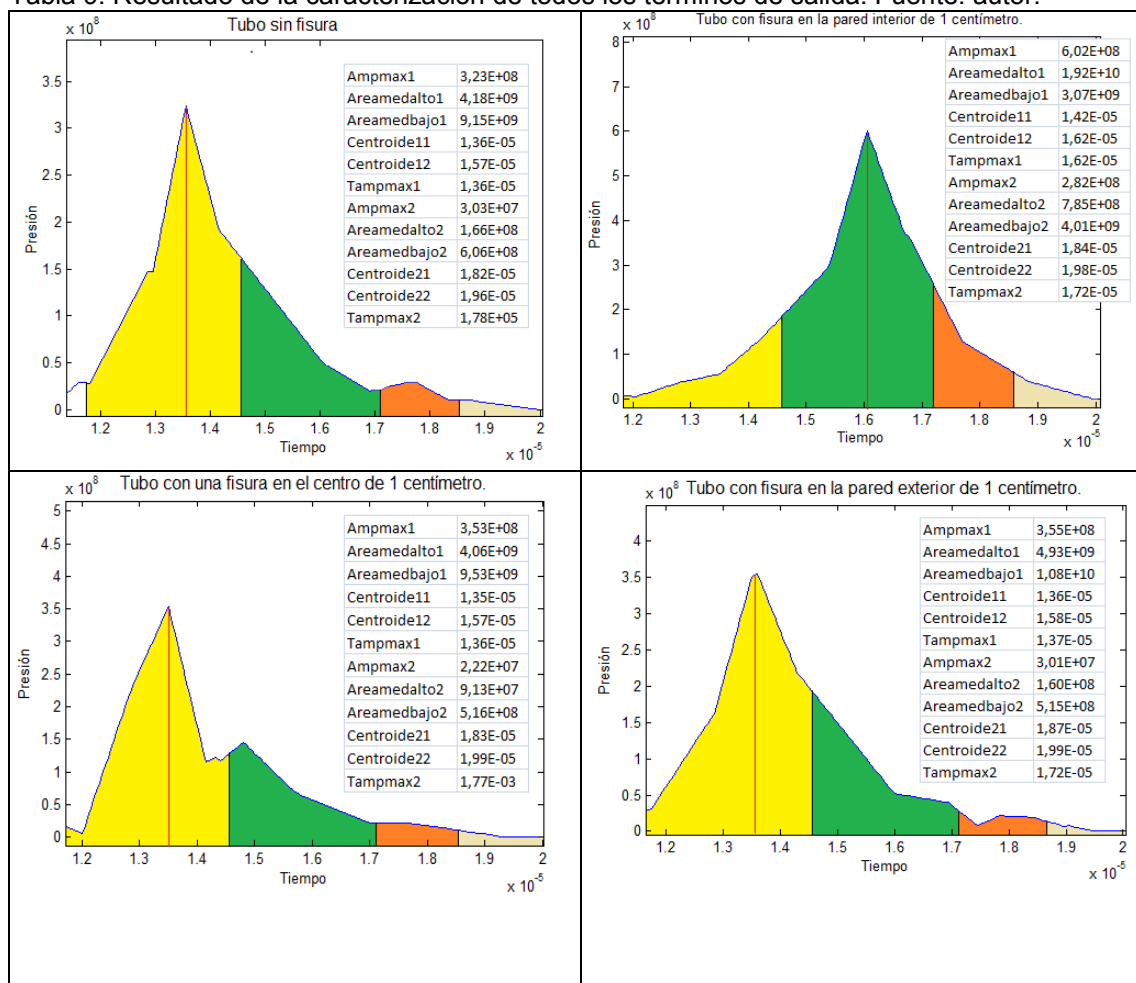
Figura 59. Determinación de las características de los ecos. Fuente: autor.

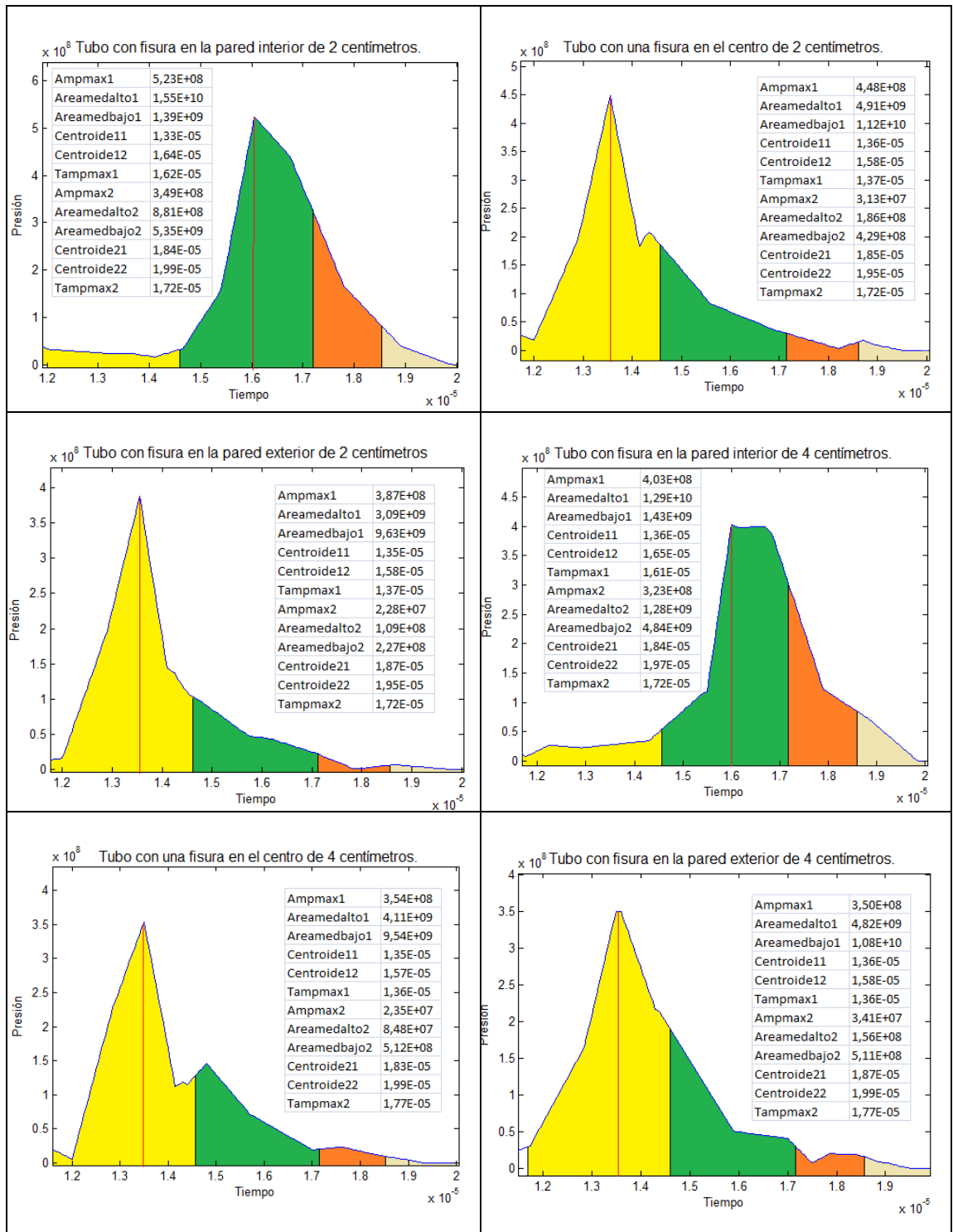
Los términos de salida del sistema son las asignaciones que se le dan a las características de los ecos por medio de las reglas de interpretación de estos. Las asignaciones son los desplazamientos axiales de una fisura, la cual varía de tamaño y tiene una profundidad constante de 2mm. En Comsol se obtienen las salidas de estos sistemas, las cuales se utilizan como entrenamiento del sistema difuso, este procedimiento se realiza para cada una de las configuraciones simuladas.

Tabla 8. Descripción de los nombres de los términos de salida

Sin fisura	Tubo sin fisura.
Fisura_int1cm	Tubo con fisura en la pared interior menor a 1 centímetro.
Fisura_centro1cm	Tubo con una fisura en el centro menor de 1 centímetro.
Fisura_ext1cm	Tubo con fisura en la pared exterior menor de 1 centímetro.
Fisura_int2cm	Tubo con fisura en la pared interior entre 1 a 2 centímetros.
Fisura_centro2cm	Tubo con una fisura en el centro entre 1 a 2 centímetros.
Fisura_ext2cm	Tubo con fisura en la pared exterior entre 1 a 2 centímetros.
Fisura_int4cm	Tubo con fisura en la pared interior entre 2 a 4 centímetros.
Fisura_centro4cm	Tubo con una fisura en el centro entre 2 a 4 centímetros.
Fisura_ext4cm	Tubo con fisura en la pared exterior entre 2 a 4 centímetros.

Tabla 9. Resultado de la caracterización de todos los términos de salida. Fuente: autor.





En total son 12 características de cada señal, se debe encontrar las que presenten mayor variabilidad con respecto a los demás sistemas. Para encontrar las señales más representativas se utiliza el Análisis de Componentes Principales (PCA).

7.1. Análisis de componentes principales

Una de las dificultades en la estadística multivariable es la visualización de datos que tienen muchas variables. Las relaciones más comunes están dadas en las graficas 2D y 3D, donde solo existen 2 y 3 variables respectivamente. Pero cuando hay más de 3 variables la visualización de sus relaciones es más complicada.

En los conjuntos de datos con muchas variables, algunas de ellas pueden tener una alta correlación lineal.

Cuando esto sucede se puede tomar ventaja de la redundancia de información, reduciendo el conjunto de variables al reemplazar el grupo por una nueva variable sencilla.

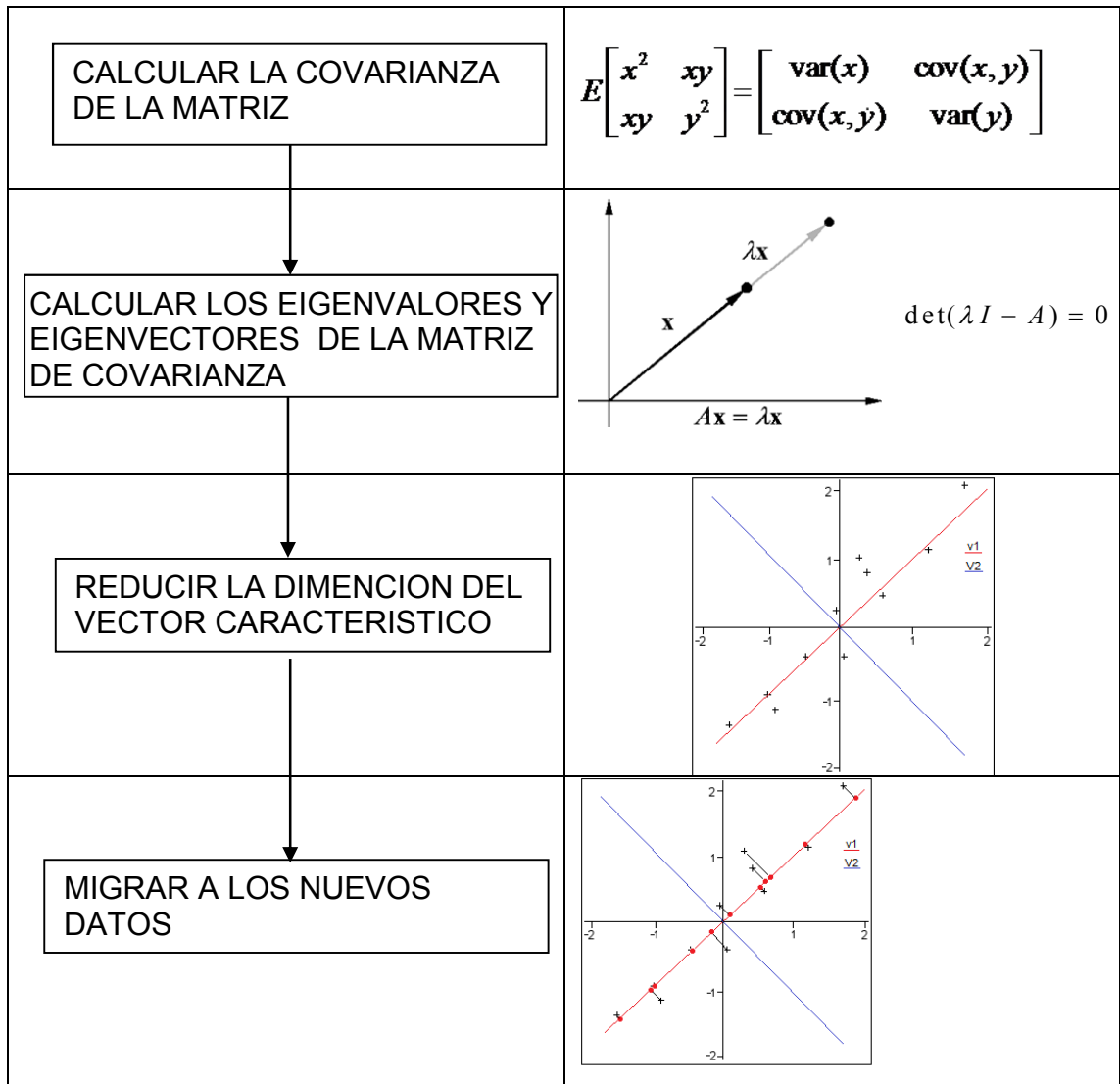
El Análisis de Componentes Principales es un método para reducir el número de variables independientes. El método genera un nuevo conjunto de variables, llamado componentes principales.

Cada componente principal es una combinación lineal de las variables originales. Todas las componentes principales son ortogonales entre si, por lo tanto no hay redundancia de información.

Los componentes principales como una completa forma en bases ortogonales del espacio de los datos.

Tabla 10. Pasos necesarios en la reducción de variables por PCA.





Los pasos necesarios en la aplicación del Análisis de Componentes Principales, a los datos de las características de la señal, se muestran en la tabla 10.

Paso 1. Extracción de la media de cada una de las dimensiones de los datos: cada característica de la señal está representada por una columna de la matriz de datos, la cual es mostrada en el anexo F. A cada dato de esa fila se le resta su respectiva media, esto produce que el conjunto de datos este centrado con media en cero. Este paso hace más fácil el cálculo de la varianza y covarianza de los datos.

Paso 2. Calcular la matriz de covarianza de los datos: mediante la matriz mostrada en la figura 60. Los datos que no están en la diagonal representan la covarianza entre filas.

$$Cov(X_i, X_j) = \begin{bmatrix} E[(X_1 - \mu_1)(X_1 - \mu_1)] & E[(X_1 - \mu_1)(X_2 - \mu_2)] & \dots & E[(X_1 - \mu_1)(X_n - \mu_n)] \\ E[(X_2 - \mu_2)(X_1 - \mu_1)] & E[(X_2 - \mu_2)(X_2 - \mu_2)] & \dots & E[(X_2 - \mu_2)(X_n - \mu_n)] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ E[(X_n - \mu_n)(X_1 - \mu_1)] & E[(X_n - \mu_n)(X_2 - \mu_2)] & \dots & E[(X_n - \mu_n)(X_n - \mu_n)] \end{bmatrix}$$

Figura 60. Matriz de covarianza. Fuente: autor.

La relación de los datos en función de la covarianza se muestra en la figura 61, si la covarianza es negativa los datos son inversamente proporcionales, cuando es cero no hay ninguna relación entre los datos y cuando es positiva la relación es proporcional.

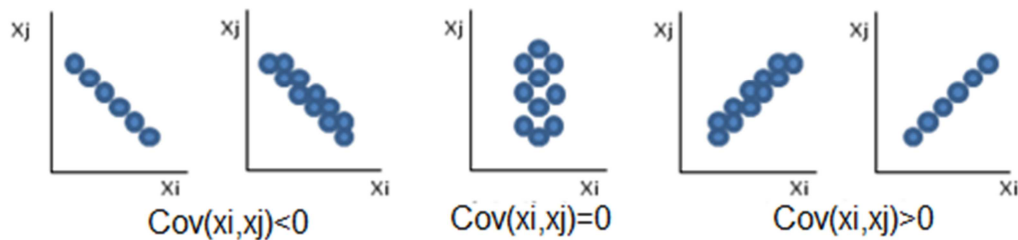


Figura 61. Relación de los datos en función de la covarianza. Fuente: autor.

Paso 3. Hallar los eigenvalores y eigenvectores de la matriz de covarianza: encontrar una matriz ortogonal P , la cual al ser multiplicada por la matriz de datos X , produzca una matriz diagonal de covarianza, donde los valores fuera de la diagonal sean cero. Cuando la covarianza es cero no hay redundancia de los datos, objetivo esencial del análisis de componentes principales.

$$Y = PX;$$

$$Cov_Y = \frac{1}{n}(PX)(PX)^T;$$

$$Cov_Y = P\left(\frac{1}{n}XX^T\right)P^T;$$

$$Cov_Y = P(Cov_X)P^T;$$

$$Cov_Y = E(Cov_X)E^T;$$

Para convertir la matriz Cov_Y en una diagonal se tiene que multiplicar Cov_X por sus eigenvectores. Los eigenvalores serán los valores que se encuentran en la matriz diagonal Cov_Y . Los valores de la matriz de eigenvectores son los mismos de los componentes principales.

Paso 4. Reducción de la matriz de componentes principales: una vez que los eigenvectores son encontrados de la matriz de covarianza, el siguiente paso es ordenarlo por el valor de significancia de los eigenvalores.

En la figura 62 se observa el porcentaje de la varianza en función de los componentes principales, la suma del porcentaje de varianza del primer, segundo y tercer componentes es de 87,74%. El resto de componentes se igualan a cero.

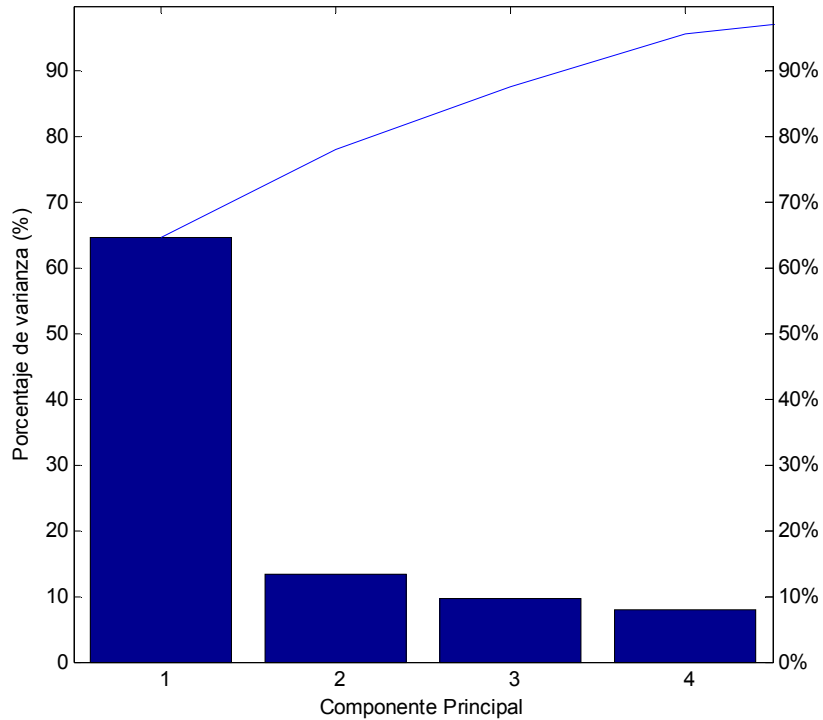


Figura 62. Porcentaje de la varianza en el primer y segundo componente principal. Fuente: autor.

Paso 5. Migrar datos a los nuevos ejes: al solo tomar en cuenta los 3 primeros componentes, los valores de los demás serán proyectados sobre los escogidos.

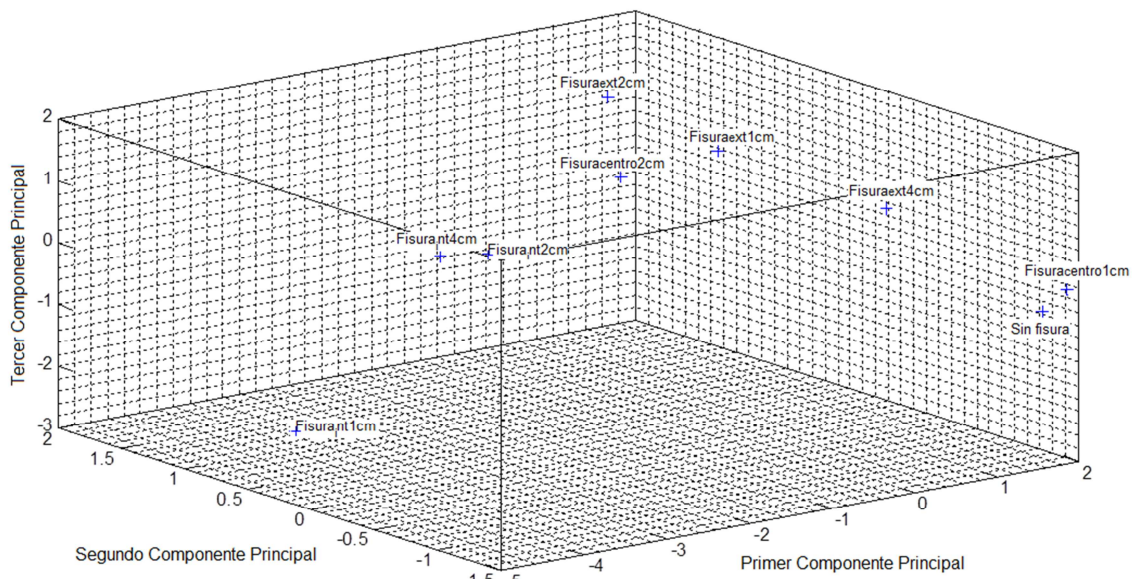


Figura 63. Datos migrados a los componentes seleccionados. Fuente: autor.

En la figura 63 se observa como las características de los sistemas simulados pasan de 12 a 3 ejes. Los datos de azul son los sistemas simulados en función de las nuevas características representadas por los componentes principales escogidos.

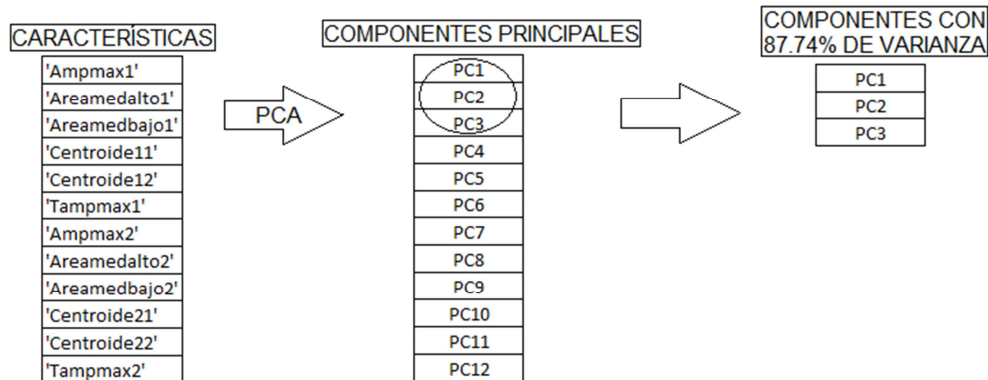


Figura 64. Resumen del proceso del análisis de componentes principales. Fuente: autor.

Después de migrar los datos de las salidas de las simulaciones a sus nuevos 3 ejes, se procede a generar un sistema de inferencia mediante lógica difusa, para la clasificación de las fisuras. El código de los pasos para el análisis de componentes principales se encuentra en el anexo G.

7.2. Lógica difusa

La base de la lógica difusa es asignar un espacio de entrada a un espacio de salida, y el principal mecanismo para hacer esto es una lista de declaraciones si-entonces llamadas reglas de estados. Todas las reglas se evalúan en paralelo, y el orden de las reglas no es importante. Las normas en sí son útiles, porque se refieren a las variables y los adjetivos que describen las variables. Antes de poder construir un sistema que interprete las normas, se debe definir todos los términos que se van a utilizar y los adjetivos que los describen. La figura 65 proporciona una ruta de pasos para el proceso de inferencia "fuzzy". En esta se muestra la descripción general y específica de un sistema difuso sobre la clasificación de fisuras.

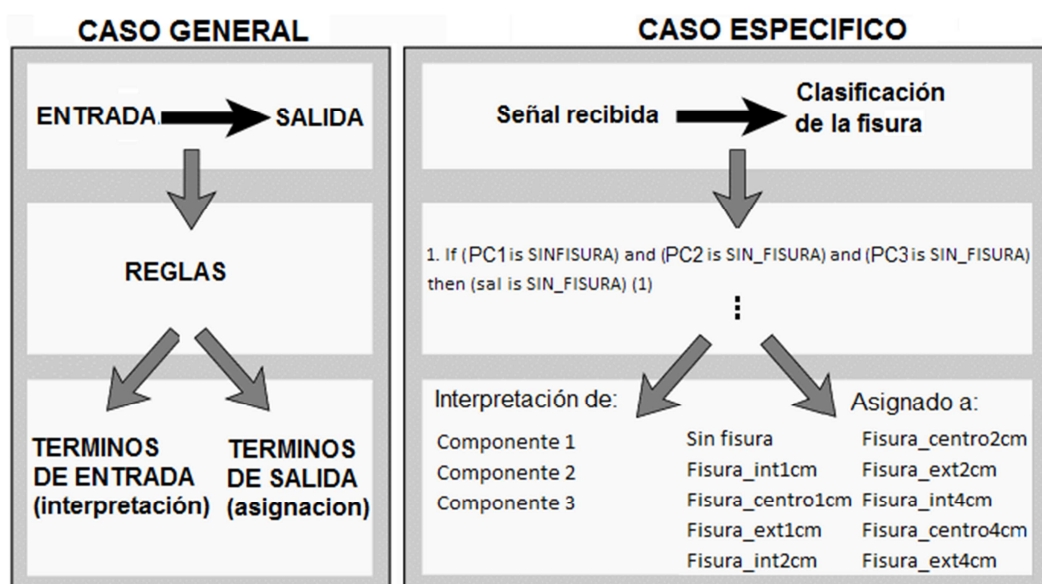


Figura 65. Especificaciones de sistemas difusos general y particular. Fuente: autor.

7.2.1. Sistemas de Inferencia Difusos

La inferencia difusa es el proceso de formulación de la asignación de una determinada entrada a una salida usando la lógica difusa. El proceso involucra: las funciones de pertenencia, operaciones lógicas y las reglas. Por lo general se aplican dos tipos de sistemas de inferencia difusos: Mamdani y Sugeno. Estos dos tipos de sistemas de inferencia varían en la determinación de las salidas. En el anexo H, se encuentra una explicación de las partes que intervienen en los sistemas de inferencia ‘fuzzy’.

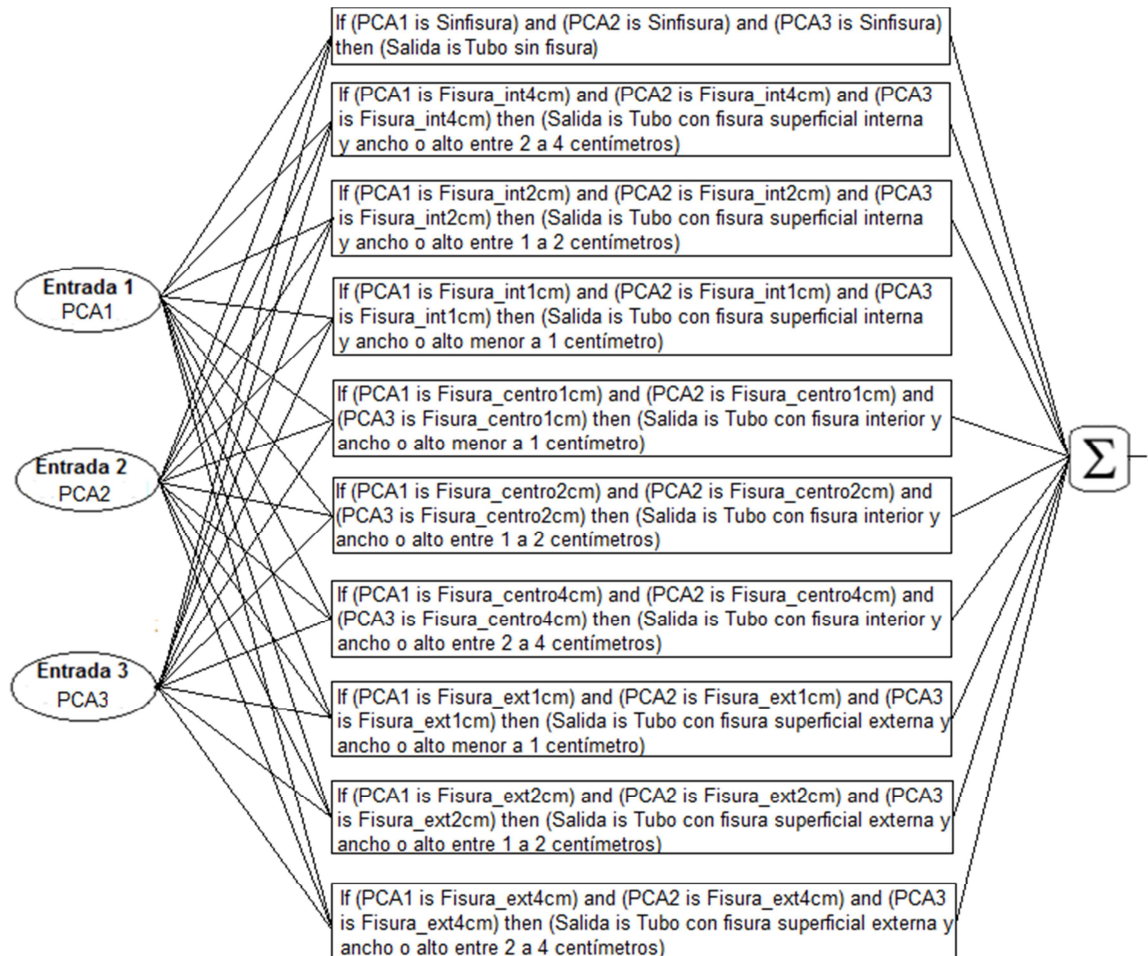
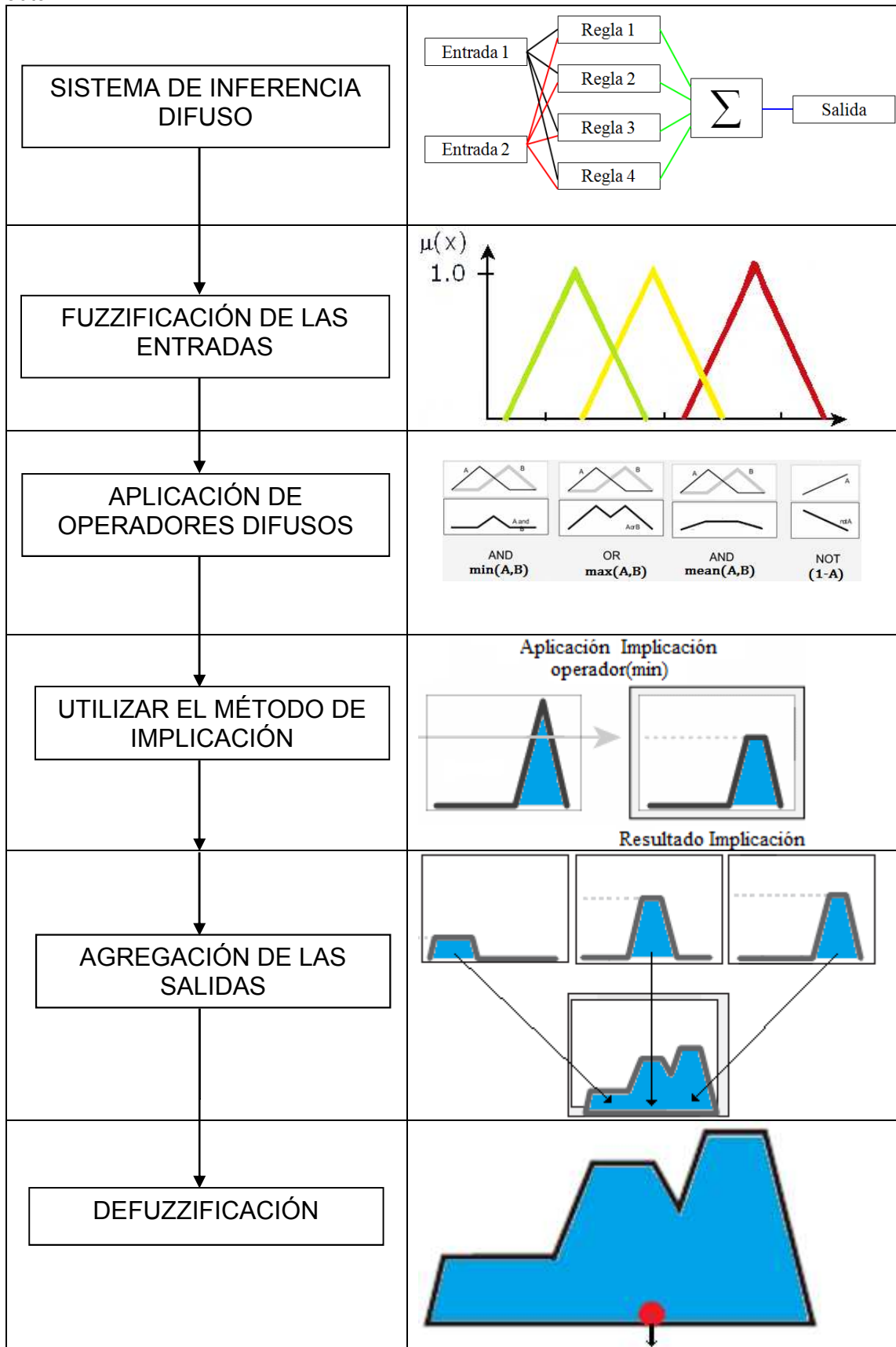


Figura 66. Antecedente y consecuente en la interpretación de las reglas. Fuente: autor.

La figura 66 muestra el esquema del sistema de inferencia ‘fuzzy’ que se utiliza para la clasificación de la señales, mediante la interpretación de las características de cada señal por medio de un conjunto de reglas. Las entradas del sistema son los 3 componentes principales de los ecos de la señal a clasificar. Por cada opción de salida del sistema habrá una correspondiente regla, cada una de estas relaciona las 3 entradas para obtener la mejor opción de salida. El sistema tiene 10 reglas y opciones de salidas.

Se ha escogido el sistema de inferencia Mamdani, ya que este tiene menor costo computacional en la determinación de las salidas.

Tabla 11. Pasos necesarios en la aplicación de un sistema de inferencia Mamdani. Fuente: autor.



En el método de inferencia difuso de Mamdani, se usan los pasos mostrados en la tabla 11.

Los pasos necesarios en la clasificación de fisuras, para el sistema de inferencia difuso son descritos a continuación:

Paso 1. Fuzzificación de las entradas: tomar las entradas y determinar el grado al que pertenezcan, a cada uno de los conjuntos difusos a través de las funciones de pertenencia. Los valores de entrada son números concisos delimitados por un rango de la variable de entrada y la salida es un grado de pertenencia difusa en el sistema de clasificación lingüística (entre 0 y 1).

Se fuzzifica cada categoría utilizando la función de pertenencia gaussiana, debido a que esta curva tienen la ventaja de ser suave y distinta de cero en todos los puntos. La media de esta curva es el valor obtenido de las características de salida de cada sistema. La varianza de la curva es la relación entre el rango de cada salida con el número de características, como se observa en las gráficas 67-69.

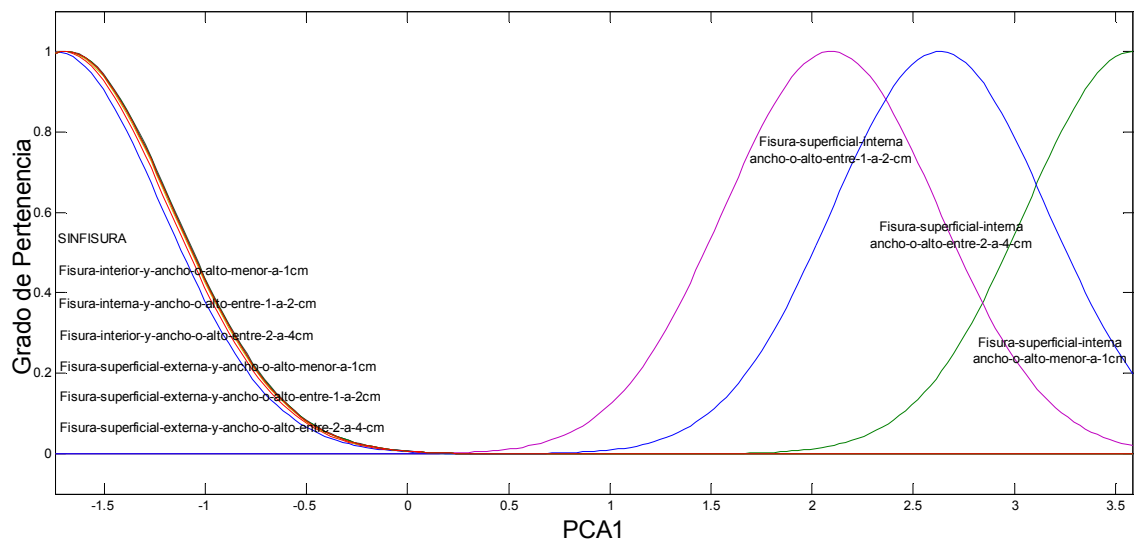


Figura 67. Grado de pertenencia de cada una de las salidas, en función de la característica PCA1. Fuente: autor.

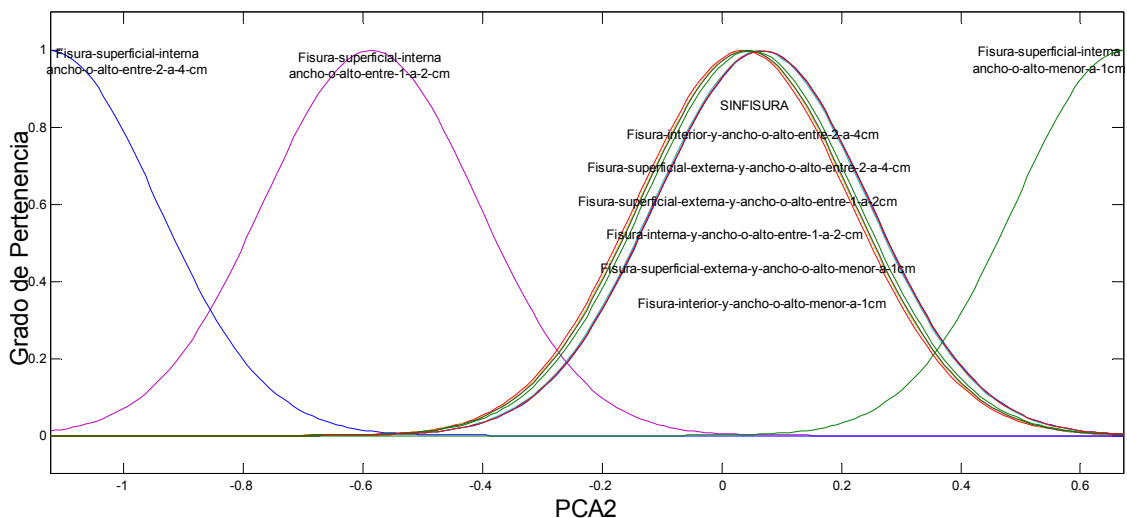


Figura 68. Grado de pertenencia de cada una de las salidas, en función de la característica PCA2. Fuente: autor.

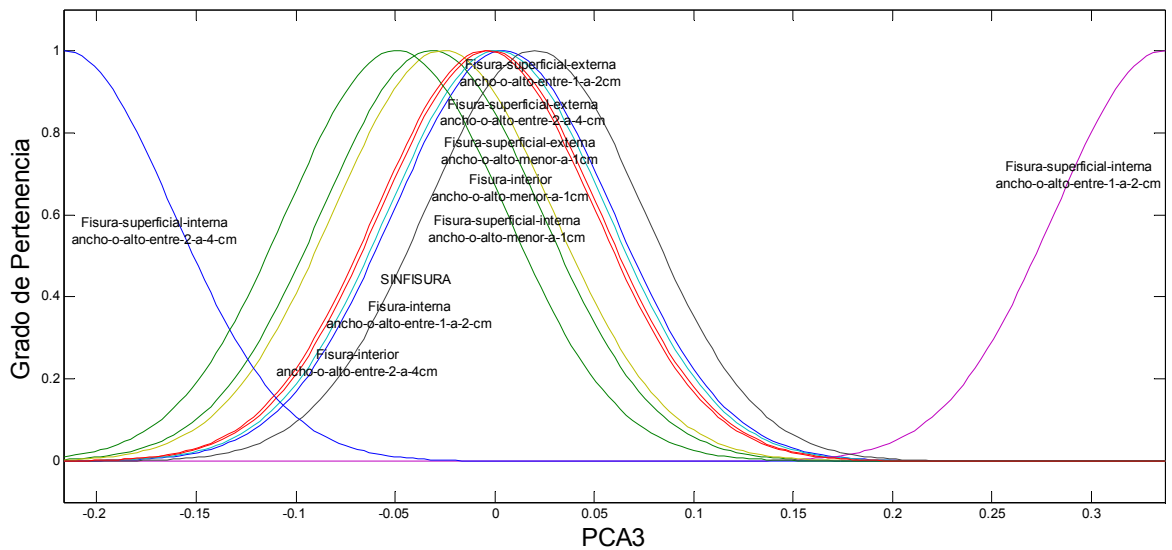


Figura 69. Grado de pertenencia de cada una de las salidas, en función de la característica PCA3. Fuente: autor.

Las salidas o categorías del sistema usan funciones de pertenencia triangulares. Estas también tienen un valor entre 0 y 1, como se observa en la figura 70.

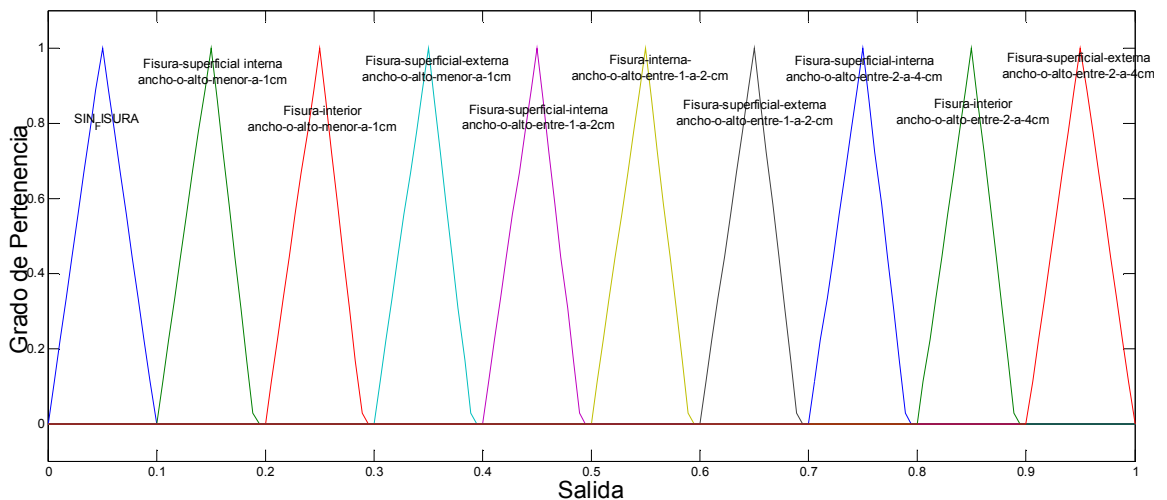


Figura 70. Grado de pertenencia de cada categoría de salida. Fuente: autor.

Paso 2. Aplicación de operadores difusos: Después de que las entradas y salidas son fuzzificadas, se sabe el grado de pertenencia que tiene cada una de las 4 características escogidas frente a la señal de los ecos. Estas señales son obtenidas de la simulación del sistema del sensor de ultrasonido con la tubería. Al obtener el grado de pertenencia de cada característica para cada una de las 11 reglas, se procede a realizarle a estos valores la función promedio. En la figura 71 se observa el resultado de las funciones de pertenencia, frente a los 3 componentes principales obtenidos de una señal de entrada. La regla y las funciones de pertenencia que determinan la salida de un sistema sin fisuras.

$if(PCA1 \text{ is SINFIURA})and(PCA2 \text{ is SINFIURA})and(PCA3 \text{ is SINFIURA})then(SALIDA \text{ is SINFIURA})$

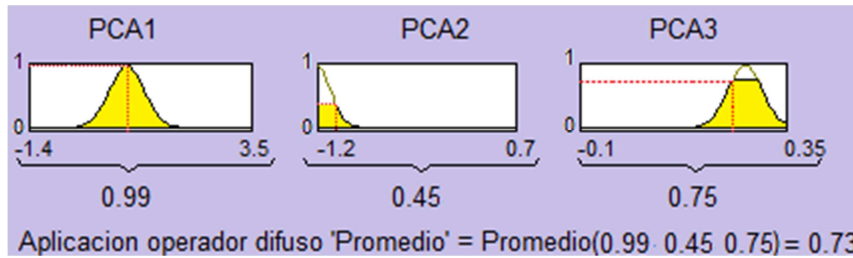


Figura 71. Promedio de las funciones de pertenencia de todas las categorías. Fuente: autor.

Paso 3. Método de Implicación: Después de obtener el valor promedio de las funciones de pertenencia de cada categoría, se utiliza este para trincar la función de pertenencia de salida que le corresponde, como se observa en la figura 72. El operador encargado de este truncamiento es 'min', este procedimiento se realiza para todas las funciones de salida, obteniendo 10 funciones truncadas.

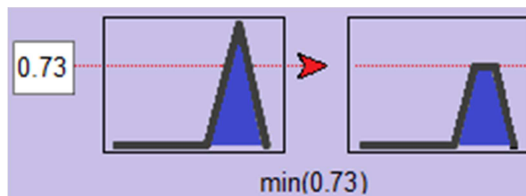


Figura 72. Método de implicación utilizando el operador de truncamiento 'min'. Fuente: autor.

Paso 4. Agregación de todas las salidas: En la figura 74 se observan en azul las 10 funciones de salida truncadas, estas funciones se agregan mediante la función 'max' generando la función final de color verde, mostrada en la figura 73.

Paso 5. Defuzzificación: Después de obtener la función de salida final, se utiliza el valor máximo para determinar la categoría a la que la señal de entrada pertenece. Se ha escogido este método al no tener relación entre las categorías de la salida.



Figura 73. Defuzzificación de la función resultante de la agregación de todas las salidas. Fuente: autor.

El código de los 5 pasos para el entrenamiento y clasificación de las características de los ecos mediante un FIS se encuentra en el anexo I.

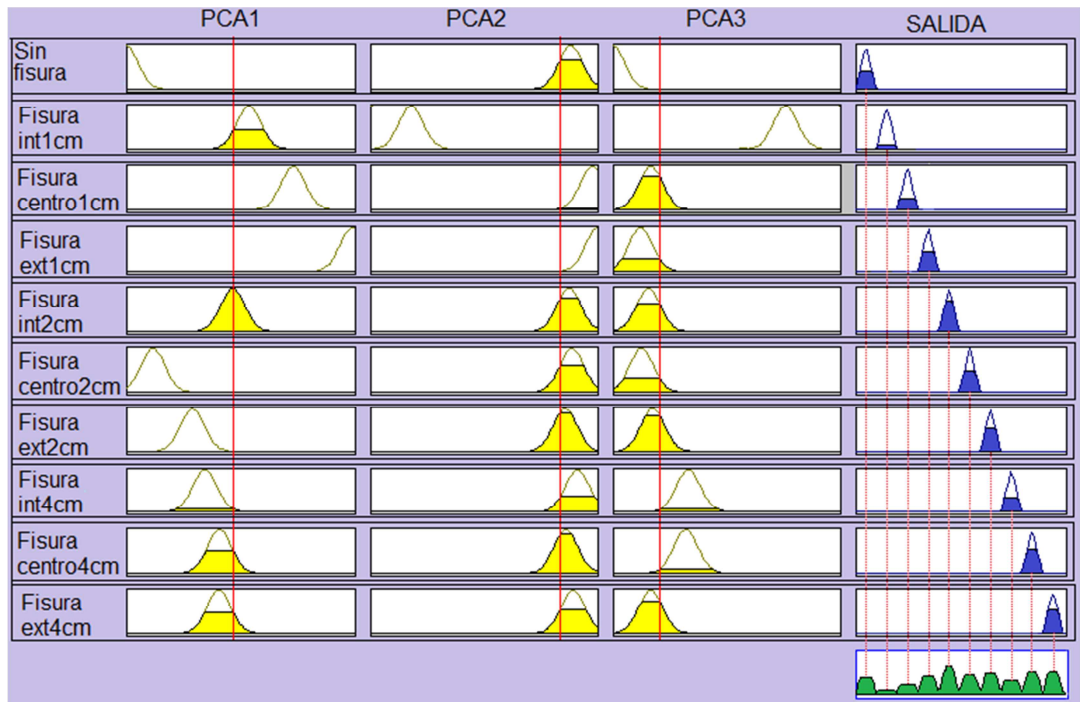


Figura 74. Configuración del FIS. Fuente: autor.

8. GENERACIÓN PERFIL DE LA TUBERÍA

Después de obtener la clasificación de la señal se procede a graficar el perfil de la tubería, dependiendo de las salidas del sistema. Cada salida del sistema representa una fisura de tamaño fijo a una distancia axial de la pared del tubo. Los pasos para generar el perfil de la tubería son:

- Mediante del radio del tubo y su espesor generar una función en coordenadas cilíndricas que grafique sus paredes interna y externa.
- Determinar el número y ángulo de cobertura de cada sensor.
- Adquirir las señales de cada sensor.
- Obtener la función que grafique las fisuras dependiendo del número de sensores y la distancia axial de la fisura, obtenida en la clasificación.

En la figura 75 se observa el sistema a simular, para obtener su perfil. Este sistema está compuesto por 5 arreglos de piezoeléctricos, los cuales leen las siguientes señales:

- Sensor 1 = Fisura Interna.
- Sensor 2 = Fisura a 2mm.
- Sensor 3 = Fisura a 5mm.
- Sensor 4 = Fisura externa.
- Sensor 5 = Sin fisura.

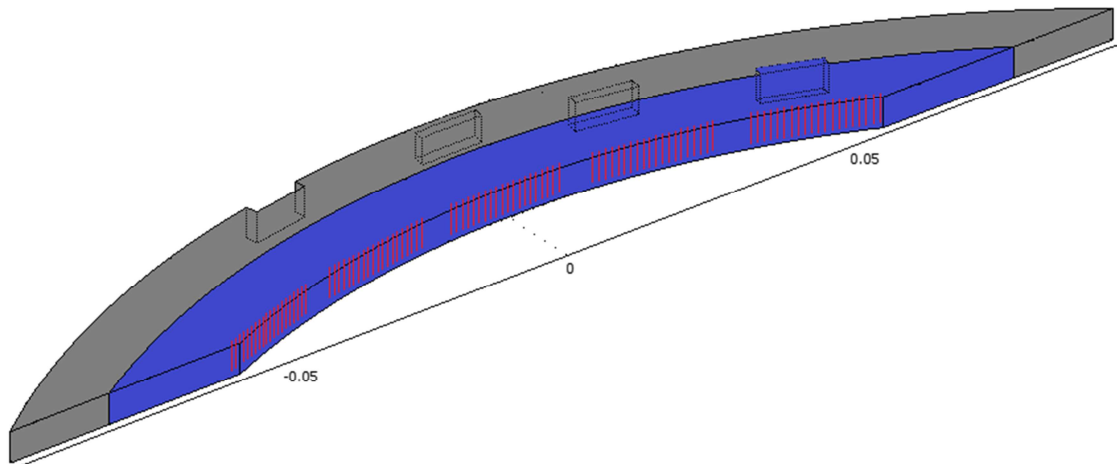


Figura 75. Sistema a simular por elementos finitos. Fuente: autor.

El radio interno del tubo es de 15cm y su grosor es de 1cm, los sensores están a 1 cm de la pared del tubo. Con estos datos se genera el perfil del tubo sin tener en cuenta la información de los sensores. En la figura 76 se observa la cobertura de un sensor de 1cm de diámetro con frecuencia de resonancia de 1 MHz, esta cobertura está dada por la ecuación 3:

$$\theta = 2 * \sin^{-1} \left(\frac{0,5 * \lambda}{D} \right); 2 * \sin^{-1} \left(\frac{0,5 * 0.005}{0.01} \right) = 28.95^\circ$$

En la figura 76 se observan 2 zonas de cobertura, la de color rojo, la cual representa el cubrimiento de mayor energía y la zona de color naranja, la cual representa la de menor energía, esta se produce por la reflexión de la señal de la pared externa. Si una fisura no se encuentra en una de estas dos zonas no podrá ser leída por los sensores, esta zona representada por el color verde se llama zona muerta.

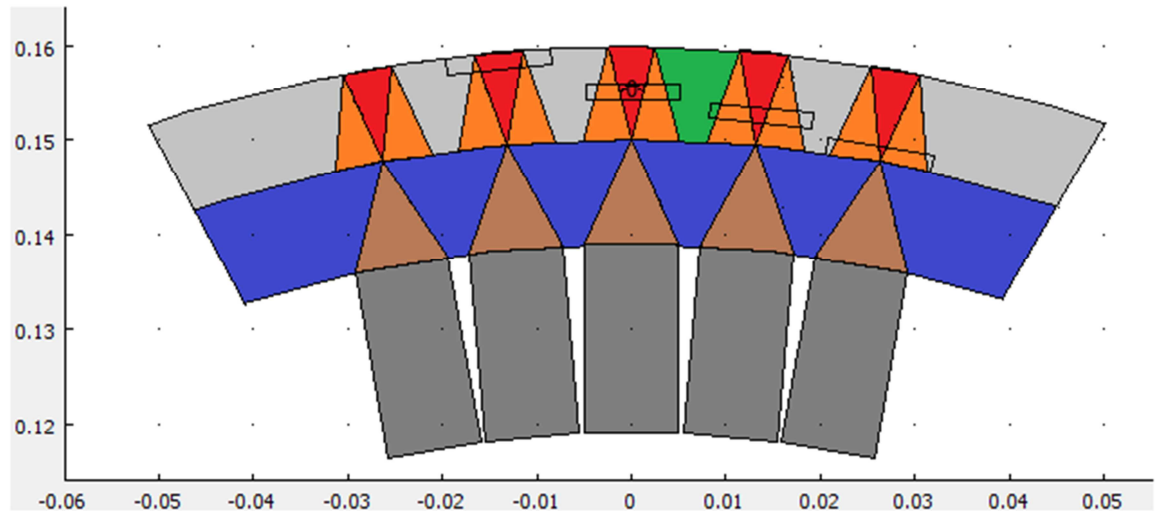


Figura 76. Cobertura del haz generado por el sensor de ultrasonido en el tubo. Fuente: autor.

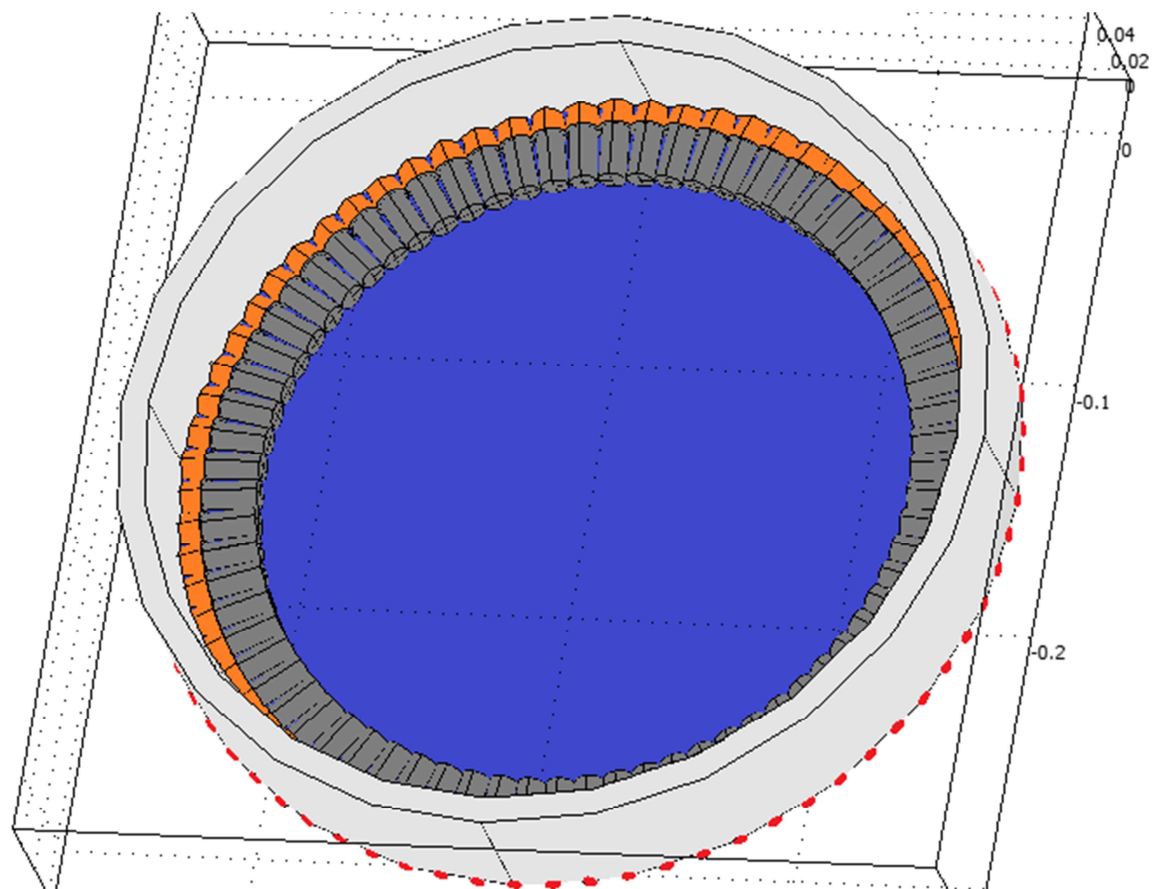


Figura 77. Sistema compuesto por 64 sensores y su cobertura en el tubo. Fuente: autor.

El ángulo central del tubo con mayor cobertura es de 5° por sensor, lo cual hace necesario 64 sensores para cubrir toda la circunferencia de la tubería, como se muestra en la figura 77.

Para obtener el perfil del sistema mostrado en la figura 75, es necesario pasar las señales de cada uno de los 5 sensores por los todos módulos anteriormente vistos, para obtener su clasificación final.

El programa que realiza el perfil de la tubería tiene como entrada: la enumeración de forma ascendente de cada uno de los 5 sensores y la distancia axial de la fisura a la pared interna del tubo. En el anexo J se encuentra el código en Matlab para la generación del perfil mostrado en la gráfica 78.

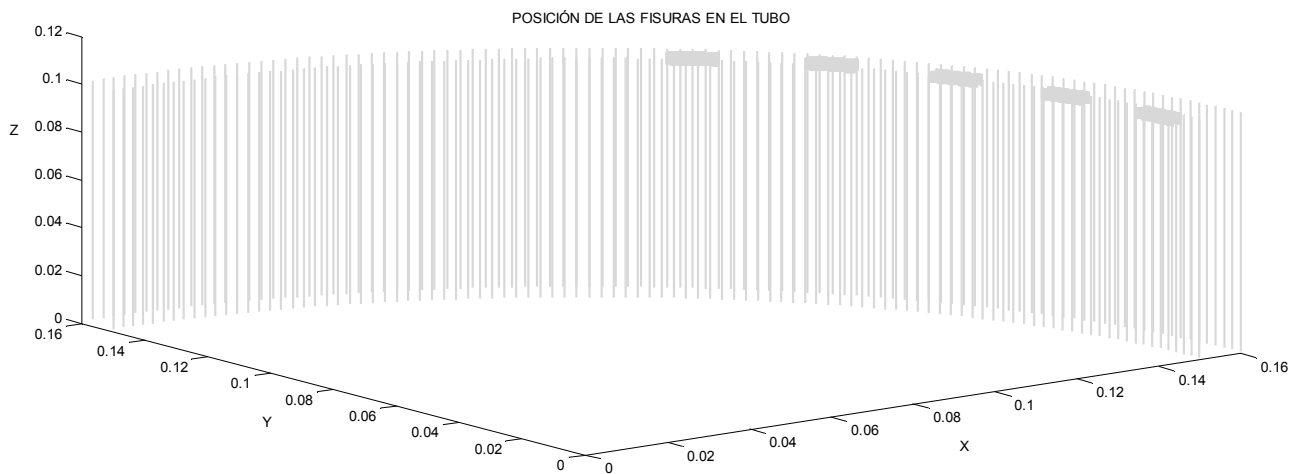


Figura 78. Perfil del tubo generado en Matlab, por las señales obtenidas de la simulación de los sensores de ultrasonido. Fuente: autor.

El siguiente paso es generar fisuras en el tubo con el alto o el ancho mayor a 1cm. Para esto se trabajaron 3 diferentes tipos de tamaño de fisuras:

- Fisuras con el alto o el ancho menor o igual a 1cm.

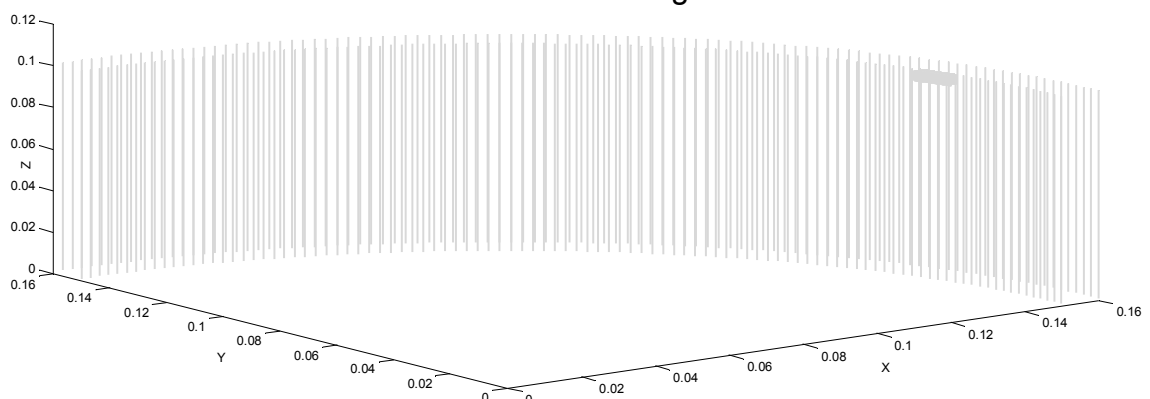


Figura 79. Perfil del tubo generado en Matlab, por la señal obtenida de una fisura con el alto o el ancho menor o igual a 1cm. Fuente: autor.

- Fisuras con el alto o el ancho entre 1cm.a 2m.

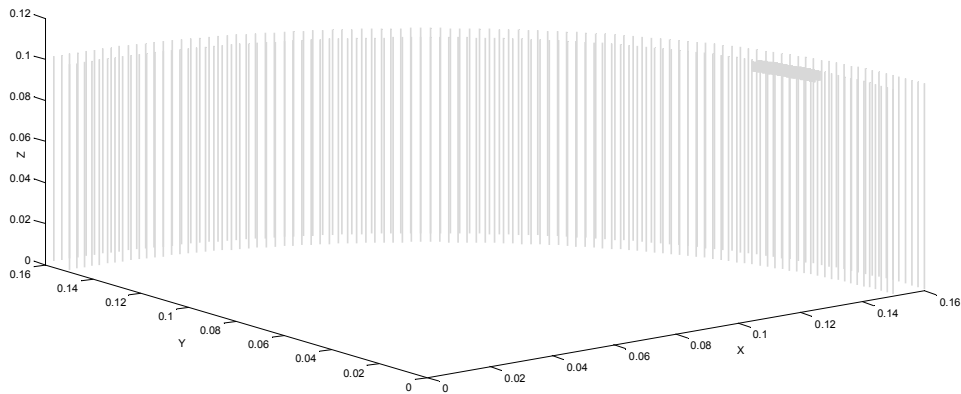


Figura 80. Perfil del tubo generado en Matlab, por la señal obtenida de una fisura con el alto o el ancho entre 1cm a 2cm.Fuente: autor.

- Fisuras con el alto o el ancho entre 2cm.a 4m.

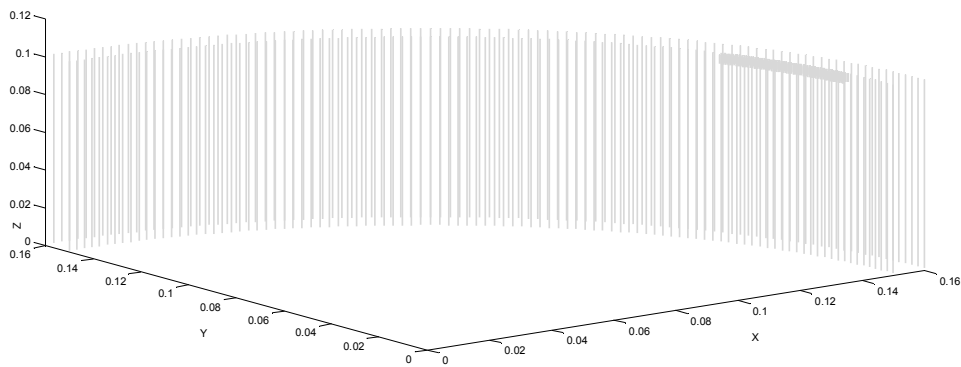


Figura 81. Perfil del tubo generado en Matlab, por la señal obtenida de una fisura con el alto o el ancho entre 2cm a 4cm.Fuente: autor.

Cada una de estas fisuras también se clasifican por la posición que tengan en la pared del tubo. Estas clasificaciones son:

- Fisuras pared interna del tubo.

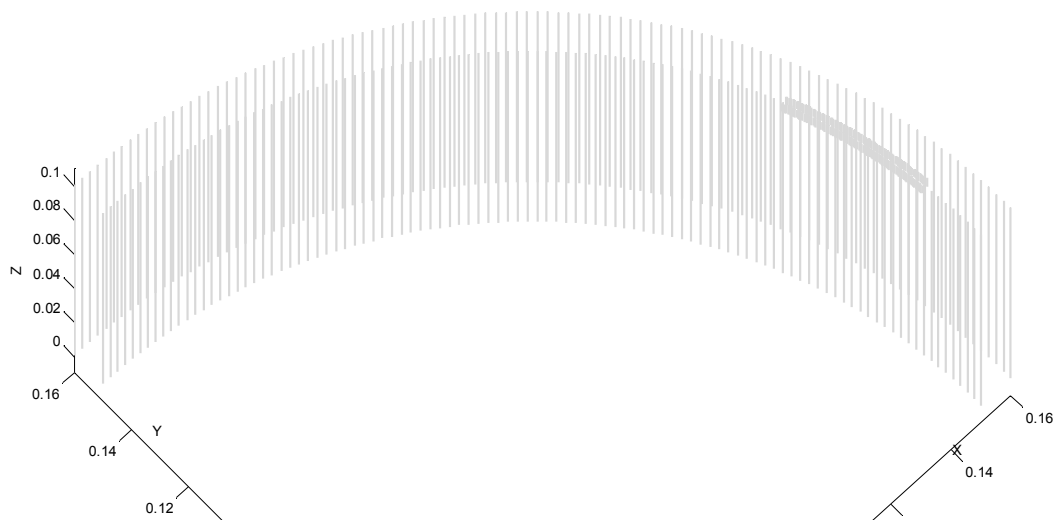


Figura 82. Perfil del tubo generado en Matlab, por la señal obtenida de una fisura superficial en la pared interior con el alto o el ancho entre 2cm a 4cm.Fuente: autor.

- Fisura dentro de la pared del tubo.

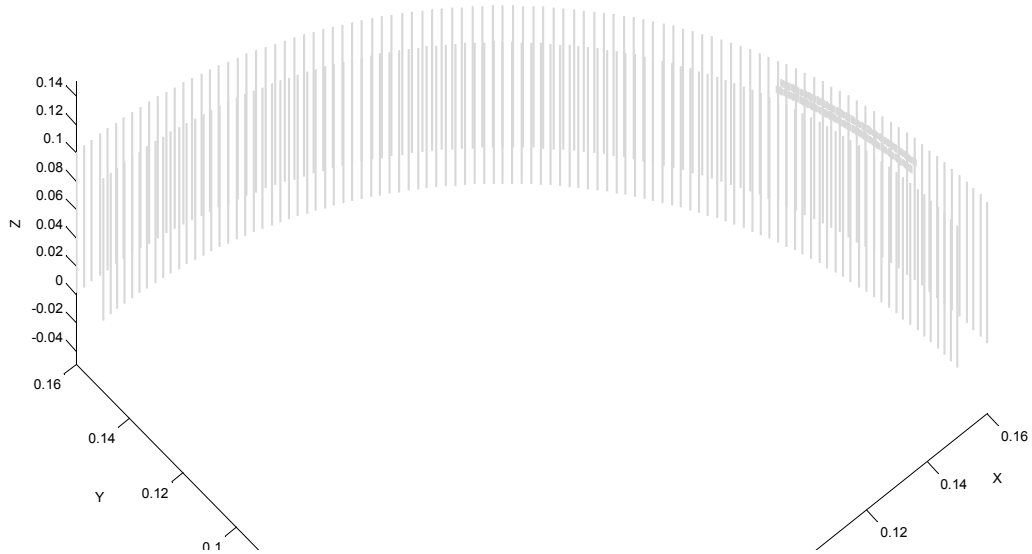


Figura 83. Perfil del tubo generado en Matlab, por la señal obtenida de una fisura interna con el alto o el ancho entre 2cm a 4cm.Fuente: autor.

- Fisura en la pared externa del tubo.

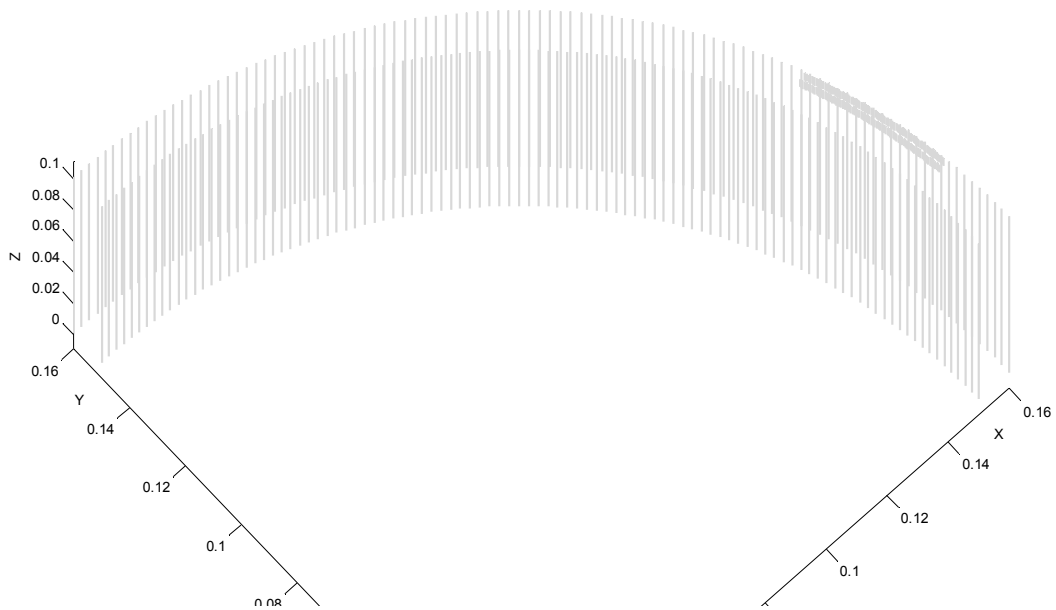


Figura 84. Perfil del tubo generado en Matlab, por la señal obtenida de una fisura superficial en la pared exterior con el alto o el ancho entre 2cm a 4cm.Fuente: autor.

En el anexo K se encuentra la función en Matlab que recibe la clasificación de la fisura y la gráfica en el tubo como se observa en la figuras de 79 a 84.

9. ONDAS GUIADAS DE ULTRASONIDO

Cuando una onda de sonido pasa de un material a otro, en un ángulo distinto de cero grados con el eje vertical, una porción de la energía de la onda se reflejará en un ángulo igual al de incidencia. Al mismo tiempo la porción de energía de la onda que se transmite en el segundo material se refracta, de conformidad con la Ley de Snell, la cual relaciona los senos de los ángulos incidente y refractado con la velocidad de la onda en cada material, como se observa en la figura 85 y en la ecuación 24.

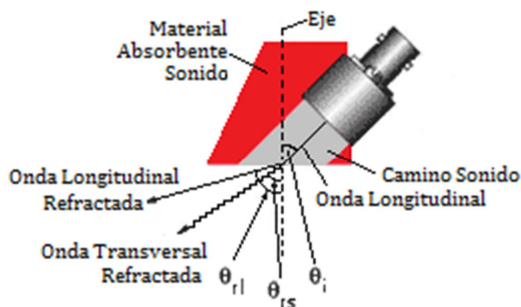


Figura 85. Ondas longitudinales y transversales refractadas producidas por una onda incidente con un ángulo con la vertical. Fuente: autor.

θ_i = Angulo incidente;
 θ_{rl} = Angulo onda longitudinal refractada;
 θ_{rs} = Angulo onda transversal refractada;
 v_i = Velocidad longitudinal del material incidente;
 v_{rl} = Velocidad longitudinal del material de prueba;
 v_{rs} = Velocidad transversal del material de prueba;

$$\frac{\sin(\theta_i)}{v_i} = \frac{\sin(\theta_{rl})}{v_{rl}} = \frac{\sin(\theta_{rs})}{v_{rs}};$$

ecuación 24

Para la interfaz agua-acero If sound velocity in the second medium is higher than that in the first, then above certain angles this bending will be accompanied by mode conversion, most commonly from a longitudinal wave mode to a shear wave mode. como se observa en la figura 86, entre 0° y 2° solo estarán las ondas longitudinales en el acero, estas van desapareciendo al acercarse a 15° . Entre 2° y 15° coexistirán las ondas longitudinales y transversales, las ondas de reflexión en el agua se mantienen constantes hasta llegar al ángulo crítico de 15° donde no habrá ninguna señal. Entre 15° y 27° solo habrá ondas transversales, teniendo menores pérdidas que las longitudinales. En 27° esta la segunda zona crítica, no hay ondas.

En la figura 87 se observa el desplazamiento de la señal en dos estructuras, en una plana y en otra circular. Se busca obtener un mayor alcance y cobertura de la señal en la estructura circular, esto se logra direccionando la señal en un ángulo de 45 grados en la tubería. Para lograr esto se tiene que tener en cuenta la relación entre R el radio y d el espesor del tubo, lo primero a calcular es el ángulo de medio paso de la estructura circular, sabiendo que este medio

paso mide d , luego utilizamos el teorema del coseno para hallar el ángulo β de la figura 87.

$$d^2 = R^2 + R^2 - 2R^2 \cos(\beta);$$

$$\beta = \cos^{-1} \left(\frac{2R^2 - d^2}{2R^2} \right);$$

ecuación 25

Como el tubo a simular tiene un diámetro de 12" con 15cm de radio y 1 cm de espesor, los valores de las variables son:

$$d = 0,01m;$$

$$R = 0,15m;$$

$$\beta = \cos^{-1} \left(\frac{2 \cdot 0,15^2 - 0,01^2}{2 \cdot 0,15^2} \right) = 3,82^\circ;$$

$$\varepsilon = \frac{180 - \beta}{2} = 88,089^\circ;$$

$$\theta = \frac{\varepsilon}{2} = 44,0445^\circ;$$

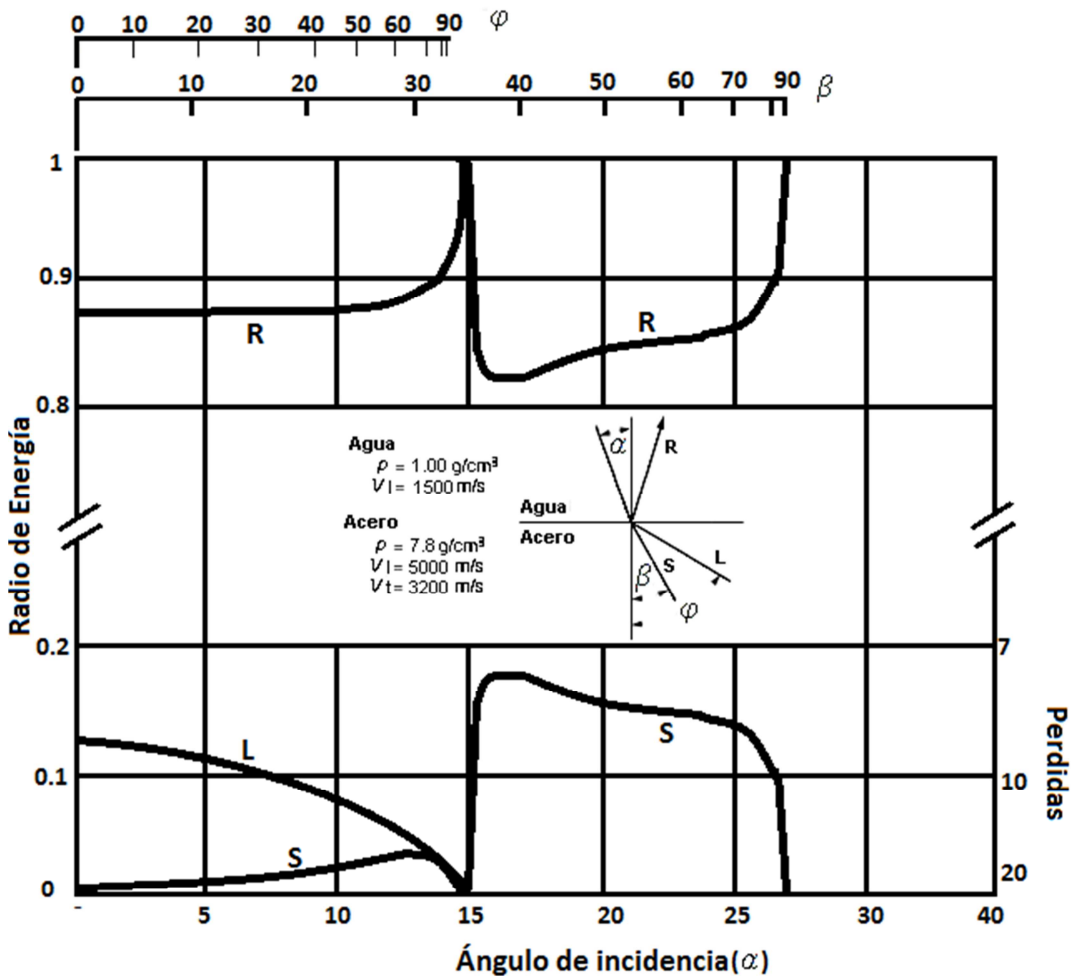


Figura 86. Radio de energía en función del ángulo de incidencia para una interfaz agua/acero. Fuente: autor.

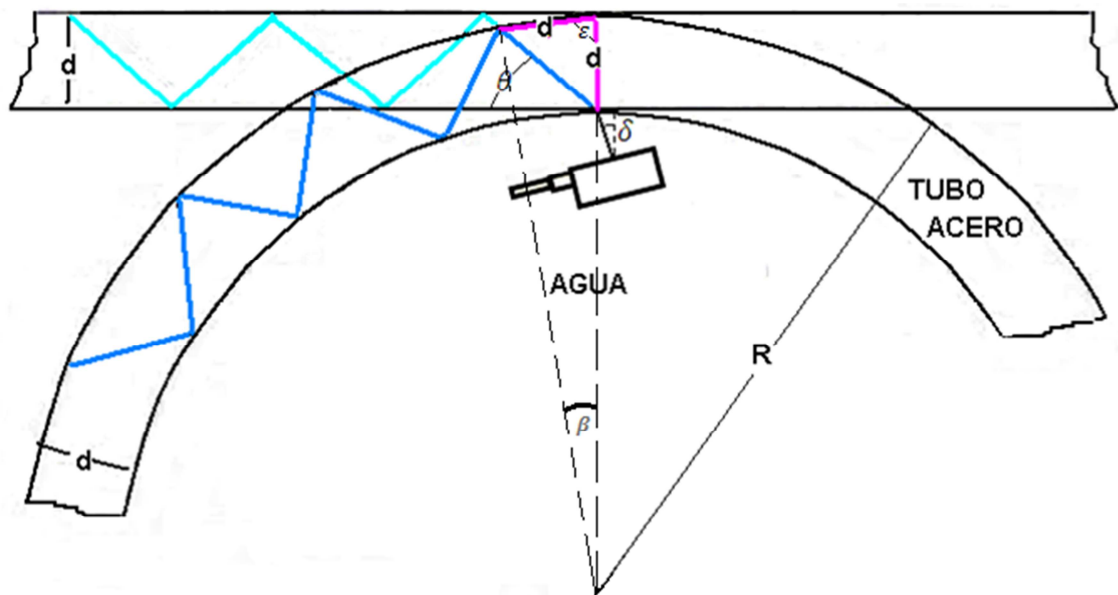


Figura 87. Vista transversal de las ondas de ultrasonido en un tubo y un bloque. Fuente: autor.

La señal debe tener un ángulo θ en la estructura circular, para que en cada medio paso recorra una altura d y un ancho d . La interfaz agua-acero genera una señal transversal con un ángulo dado por la ley de Snell, como se observa en la figura 85.

$$\frac{\text{Sen}(\delta)}{v_{\text{agua}}} = \frac{\text{Sen}(90-\theta)}{v_{\text{transversalAcero}}};$$

$$\delta = \text{sen}^{-1} \left(\frac{v_{\text{agua}} \cdot \text{Sen}(90-\theta)}{v_{\text{transversalAcero}}} \right) = \text{sen}^{-1} \left(\frac{1500 \cdot \text{Sen}(90-44,0445)}{3200} \right) = 19,69^\circ$$

$$L_p = \frac{d \cdot \text{sin}(\epsilon)}{\text{sin}(90-\theta)} = \frac{0,01 \cdot \text{sin}(88,09)}{\text{sin}(90-44,0445)} = 0,0139\text{m}$$

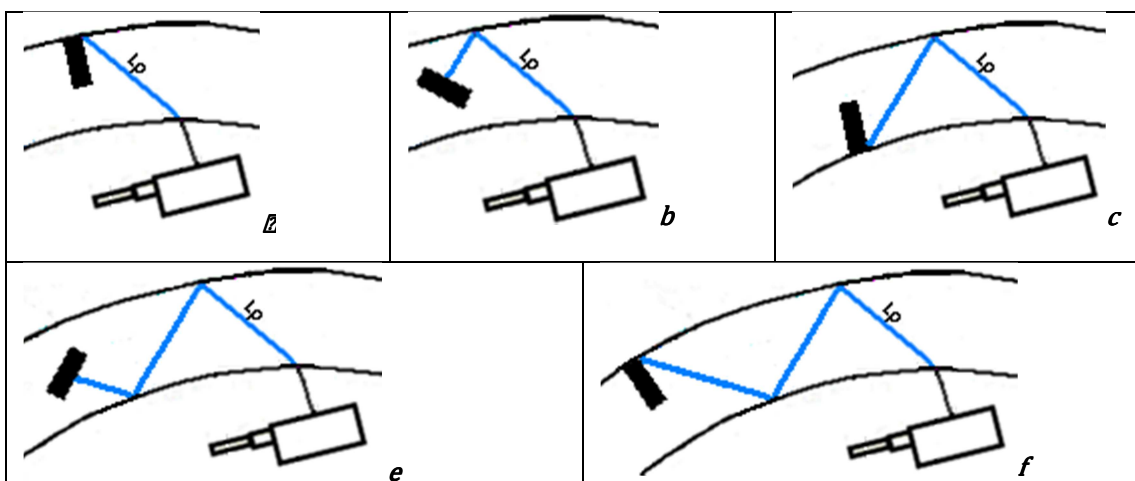


Figura 88. Configuraciones de distintas posiciones de fisuras para determinar su atenuación. Fuente: autor.

Mediante la longitud del paso L_p , se hallan las pérdidas de la señal por la atenuación por distancia e interfaces, para los casos mostrados en la figura 88. La atenuación por la distancia del piezoeléctrico al tubo(0,01m) mas $L_p(0,0139m)$ y vuelta, para el caso (a) de la figura 88 es:

$$3dB * \left(\frac{0,0478}{0,001725}\right): -83,1304dB.$$

El coeficiente de reflexión por la interfaz agua-acero es:

$$R = \left(\frac{(2496e4-15e5)}{(2496e4+15e5)}\right)^2 = 0,786.$$

El coeficiente de transmisión es $1-0,786=0,214$, su atenuación es $-6,6958dB$ en la señal que se transmite por la interfaz.

El coeficiente de reflexión por la interfaz acero-aire es:

$$R = \left(\frac{(428,75-15e5)}{(428,75+15e5)}\right)^2 = 0,998$$

La atenuación por la interfaz acero/aire es:

$$10 * \log(0.998) = -0,0086dB.$$

La suma de las atenuaciones da como resultado la atenuación total.

$$Atenuación_{total\ eco} = Atenuación_{distancia\ 0,0478m} + Atenuación_{interfaz1} + Atenuación_{interfaz2} + Atenuación_{interfaz1} = -83,1304dB - 6,6958dB - 0,0086dB - 6,6958dB = -96,5306dB$$

Tabla 12. Atenuaciones de los sistemas de la figura 88. Fuente: autor.

	a	B	C	d	e
Longitud camino	$2(L_p + 0,01)$	$2\left(\frac{3}{2}L_p + 0,01\right)$	$2(2L_p + 0,01)$	$2\left(\frac{5}{2}L_p + 0,01\right)$	$2(3L_p + 0,01)$
Atenuaciones por longitud del camino	-83,1304dB	-107,3043dB	-131,478dB	-164,347dB	-197,217dB
Atenuaciones por interfaces	-13,4002dB	-13,4088dB	-14,454Db	-15,5003dB	-15,5089dB
Atenuación total	-96,5306dB	-120,7131dB	-145,932dB	-179,8473dB	-212,725dB

El ángulo de dispersión μ de cada sensor en el acero esta dado por la ecuación 3:

$$\mu = 2 * \sin^{-1}\left(\frac{0,5 * \lambda}{D}\right); 2 * \sin^{-1}\left(\frac{0,5 * 0,0032}{0,01}\right) = 18.41^\circ$$

Los ángulos θ y δ fueron determinados anteriormente y se explican en la figura 87.

$$\theta = 44.04^\circ$$

$$\delta = 19.69^\circ$$

En la figura 89 se observa el posicionamiento de los sensores de ultrasonido para generar ondas guiadas a 45° dentro del tubo. El ángulo central de cobertura es de 5° por sensor.

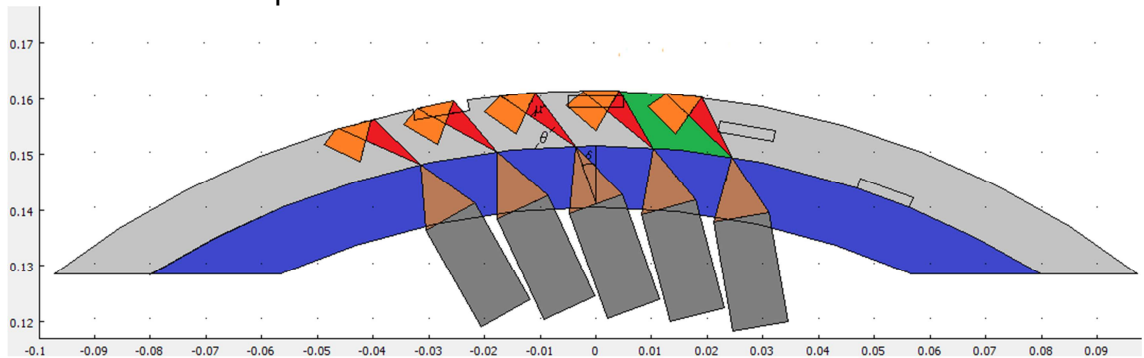


Figura 89. Configuración del sistema con ondas guiadas. Fuente: autor.

Como se observa en la tabla 11 al utilizar sensores con las mismas características y utilizarlos en las configuraciones de ondas normales y guiadas, se obtienen mejores resultados con las ondas normales a la superficie, ya que estas tienen mayor cobertura por su ángulo de dispersión y mayor velocidad y amplitud en la tubería.

Tabla 11. Comparación entre las configuraciones de ondas normales y ondas guiadas. Fuente: autor.

	ONDAS NORMALES	ONDAS GUIADAS
Frecuencia sensor	1MHz	1Mhz
Diámetro sensor	1cm	1cm
Longitud de onda	0.005m	0.0032m
Trayectoria recorrida por el haz	2cm	2cm
Angulo central de cubrimiento por sensor	5°	5°
Velocidad del sonido en el acero	$5000 \frac{m}{s}$ (Ondas longitudinales)	$3200 \frac{m}{s}$ (Ondas transversales)
Angulo de dispersión de cada sensor en el acero	28.95°	18.41°
Área sin cubrimiento entre señales de 2 sensores	$4.844e-5m^2$	$7.983e-5m^2$

10. ONDAS NORMALES A LA SUPERFICIE DEL SENSOR CON MOVIMIENTO LONGITUDINAL

El anillo de ultrasonido está expuesto a una fuerza perpendicular a su base, esta fuerza se debe a la presión generada por el flujo que lleva la tubería dentro. El anillo no tiene una velocidad constante, a causa de esto lleva un odómetro el cual divide la distancia recorrida para activar el pulso de excitación, como se observa en la figura 90.

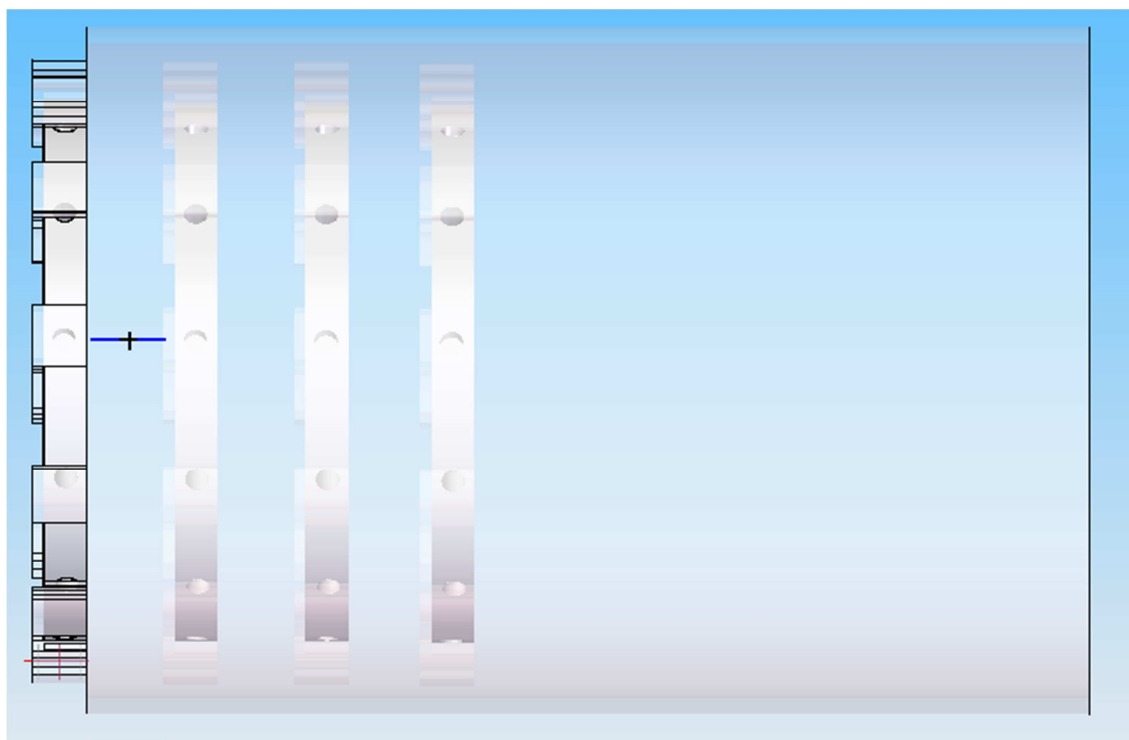


Figura 90. Desplazamiento del anillo de sensores de ultrasonido en la tubería. Fuente: autor.

Al escoger la configuración del anillo con 64 sensores, con ondas normales a la superficie, se tiene una cobertura del haz de la señal de cada sensor mostrada en la figura 91.

El volumen rojo corresponde a la cobertura del sensor que va desde el punto focal en la pared interna del tubo hasta la pared externa. En este volumen de cobertura se tendrá la máxima presión, luego al chocar el haz en la pared externa este se refleja hacia la pared interna de la forma mostrada en la figura 91. Este volumen de color naranja muestra el aumento de la cobertura pero la disminución de la presión.

El ángulo de apertura del haz cambia de la pared interna a la base del sensor, este disminuye ya que cambia su medio de transmisión de sonido del acero al agua.

El radio de cobertura del haz al llegar al sensor es de 0.0066m. El radio del sensor es de 0.005m, esto le da al sensor un rango de movimiento antes de salir de la zona de cobertura.

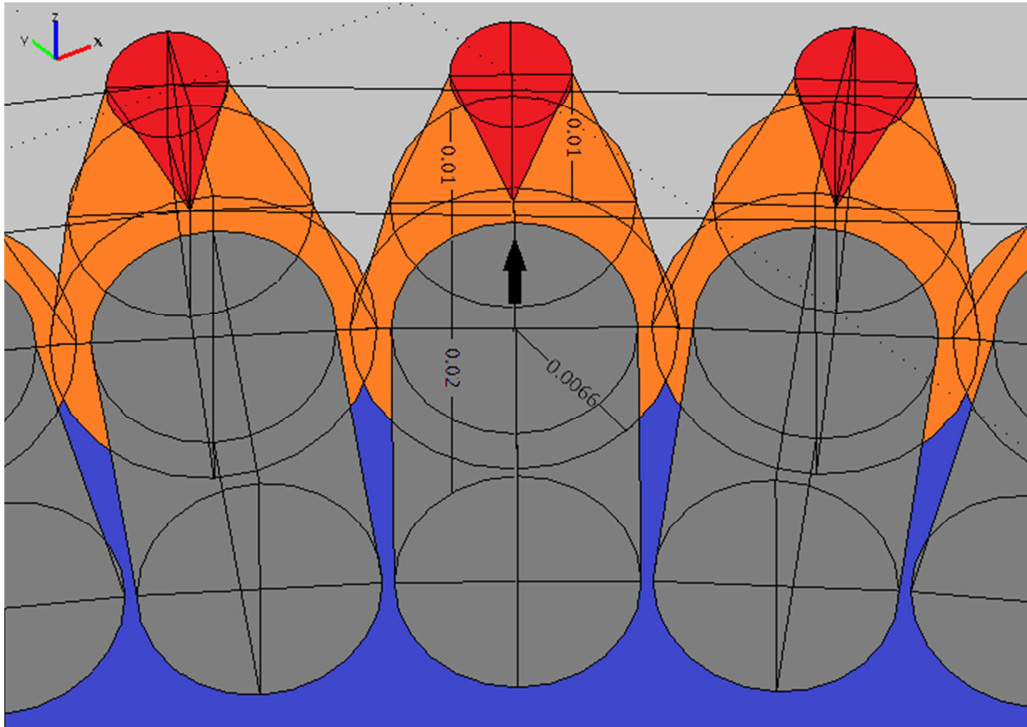


Figura 91. Medidas de la cobertura del haz del sensor en 3D. Fuente: autor.

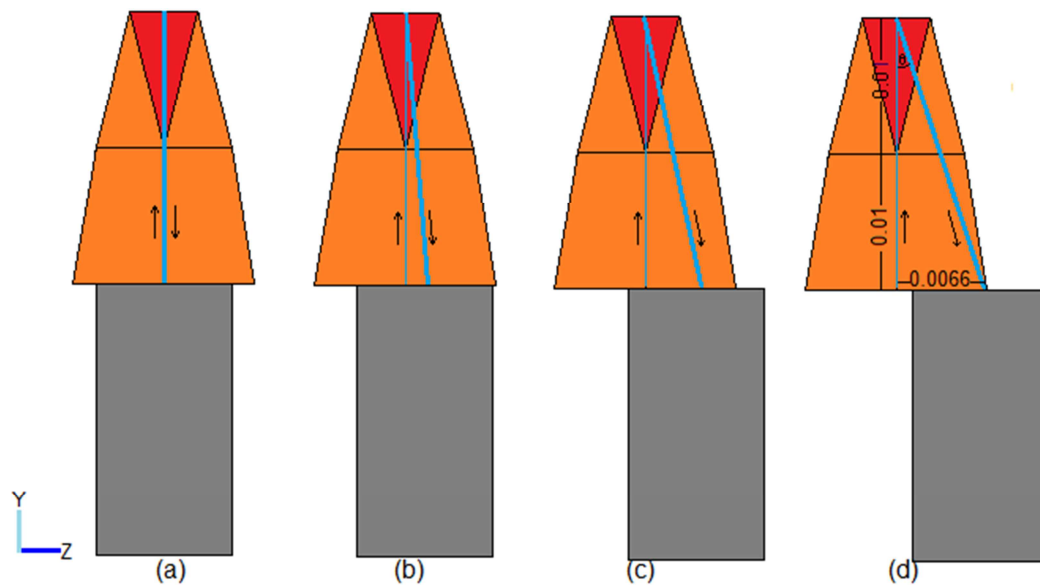


Figura 92. Desplazamiento del sensor comparado con el volumen de cobertura de su haz. Fuente: autor.

En la figura 92 se observa cómo cambia el recorrido de la señal del eco en función del cambio de posición del sensor en dirección del eje z.

En el caso (a) de la figura 92 no hay movimiento del sensor, para este caso se tienen los siguientes tiempos de llegada de la señal del primer y segundo eco:

Tiempo total en agua:

$$t1 = \frac{x_{interfaz\ ida\ y\ vuelta}}{C_{s\ agua}}; t1 = \frac{(0,02)}{1500}; 1,333e-5s.$$

Tiempo total en acero:

$$t2 = \frac{x_{interfaz\ ida\ y\ vuelta}}{C_{s\ acero}}; t2 = \frac{(0,02)}{5000}; 4e-6s.$$

Tiempo total:

$$t_{interfaz\ 2} = t1 + t2; 1,73333e-5s.$$

En el caso (d) de la figura 92, se tiene el máximo desplazamiento del sensor antes de salir de la zona de cobertura, esta distancia es de 0.0066m. Para este caso se tienen los siguientes tiempos de llegada de la señal del primer y segundo eco:

Tiempo de ida en agua:

$$t1 = \frac{x_{interfaz\ ida}}{C_{s\ agua}}; t1 = \frac{(0,01)}{1500}; 6,66e-6s.$$

Tiempo de ida en acero:

$$t2 = \frac{x_{interfaz\ ida}}{C_{s\ acero}}; t2 = \frac{(0,01)}{5000}; 2e-6s.$$

Tiempo total de ida:

$$t_{total\ ida} = t1 + t2; 8,66e-6s.$$

El ángulo formado por la señal de ida y vuelta es:

$$\theta = \arcsin^{-1} \frac{0.0066}{0.02}; 18.26^\circ$$

Tiempo de vuelta en agua:

$$t1 = \frac{x_{interfaz\ vuelta}}{C_{s\ agua}}; t1 = \frac{0.01/\cos\theta}{1500}; \frac{0.01053}{1500}=7.02e-6.$$

Tiempo de vuelta en acero:

$$t2 = \frac{x_{interfaz\ vuelta}}{C_{s\ acero}}; t2 = \frac{(0,02/\cos\theta)-0.01053}{5000}; \frac{0.01053}{5000}=2.106e-6s.$$

Tiempo total de vuelta:

$$t_{total\ vuelta} = t1 + t2; 9,126e-6s.$$

Tiempo total:

$$t_{total} = t_{total\ ida} + t_{total\ vuelta}; 1,778e-5s.$$

Tomando como base este tiempo y la distancia máxima que puede recorrer el sensor antes de salir de la zona de cobertura, se halla la velocidad máxima a la que puede viajar el anillo de sensores.

$$Vel_{max} = \frac{0,0066}{t_{total}}; 371,2 \frac{m}{s}.$$

La velocidad obtenida es exageradamente alta comparada con la velocidad real a la cual viaja el 'smart pig', la cual es de $10 \frac{km}{h}$. Esta velocidad expresada en el sistema internacional es $2,77 \frac{m}{s}$.

La distancia recorrida por el sensor con esta velocidad está dada por:

$$t1 = \frac{0,01/\cos\theta}{1500};$$

$$t2 = \frac{(0,02/\cos\theta) - 0,01/\cos\theta}{5000};$$

$$t_{total\ vuelta} = t1 + t2;$$

$$t_{total\ ida} + t_{total\ vuelta} = t_{desplazamiento\ del\ anillo}.$$

$$t_{total\ ida} + \frac{0,01/\cos\theta}{1500} + \frac{0,01/\cos\theta - 0,02*\tan\theta}{5000} = \frac{0,02*\tan\theta}{2,77};$$

$$8,666666e-6 + \frac{13}{1500000} = \frac{0,02*\sin\theta}{2,77};$$

$$\theta = 0,137°;$$

$$Y_{desplazamiento\ del\ sensor} = 0,02 * \tan\theta = 4,782e-6m.$$

El tiempo de vuelo de la onda está determinada por:

$$\frac{0,02*\tan\theta}{2,77} = 1,7333e-5s.$$

Este tiempo es similar al del sensor sin movimiento. Con esto se puede concluir que se puede despreciar la distancia recorrida por el anillo con esta velocidad.

En la figura 93 se observa la distancia escogida para producir la emisión de la señal en el sensor de ultrasonido, esta es de 5mm, ya que permite una total cobertura en la coordenada z del tubo.

$$\text{Con una velocidad de } 2,77 \frac{m}{s}, \text{ se tiene un tiempo de } \frac{0,005}{2,77} = 1,805e-3s.$$

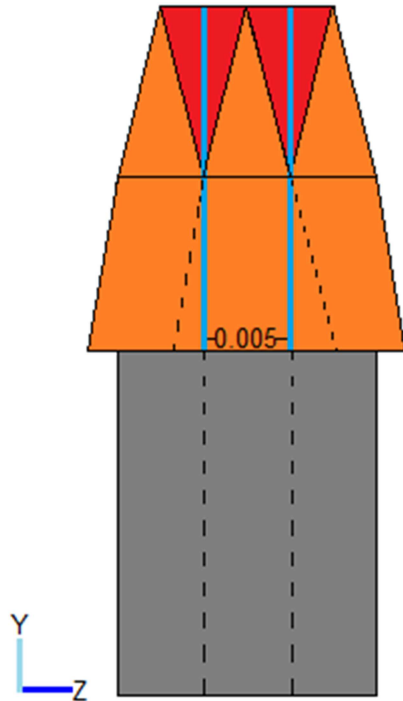


Figura 93. Distancia a la cual se activa el pulso de excitación del sensor en movimiento.
Fuente: autor.

La frecuencia de excitación del sensor estará dada por el inverso de este tiempo:

$$f_{excitacion} = \frac{1}{1.805e-3} = 554\text{Hz.}$$

Con este periodo de excitación, el cual es mucho más alto que el tiempo de vuelo de la señal, se asegura que no hay un efecto doppler considerable en la frecuencia de excitación.

CONCLUSIONES

Se desarrolló un sistema por simulación que permite establecer la viabilidad del uso de un anillo con sensores de ultrasonido para la detección de fisuras en tuberías.

El primer paso que se realizó fue la selección del piezoeléctrico de emisión/detección del anillo. Las características escogidas fueron:

- 1MHz de frecuencia de resonancia de los piezoeléctricos
- 1cm de distancia de los sensores a la pared del tubo.
- Sensibilidad del sensor de 1cm superficial y 2mm axial.

El segundo paso fue la simulación del sistema mediante elementos finitos.

- Esta simulación tubo un gran costo computacional, ya que el sistema se simuló en función del tiempo y espacio en 3D. Éste tipo de simulaciones son las de mayor complejidad porque se necesitan despejar un gran número de ecuaciones de la matriz que representa el sistema. Para estas simulaciones se utilizan clústeres de computadoras o *'workstations'* (computadoras especializadas en simulación). Éste fue el mayor inconveniente, ya que no se contaba con la infraestructura necesaria para las simulaciones. Se utilizó para este fin un computador portátil comercial el cual fue incapaz de realizar esta simulación, por lo tanto se utilizó una estructura en 2D, la cual se le realizó una extrusión de 5mm de longitud. Al cubrir tan poca distancia longitudinal, hace que la simulación de este sistema sea una parcial aproximación del sistema real.

El tercer paso fue el procesamiento de la señal generada por la simulación. En este proceso se encontraron las siguientes características:

- Los *'phased array'* poseen las cualidades de focalización direccionada y mayor cobertura comparados con los sensores convencionales. Estas características hacen que sean ideales para la inspección de tuberías, su único problema es su elevado costo.
- Los sensores con focalización cilíndrica presentan mejor rendimiento en la lectura de los ecos, ya que concentran el haz de ultrasonido a una distancia cercana a la pared del tubo(1cm).
- La extracción de ruido por medio de la DWT demuestra ser una poderosa herramienta en la identificación de los ecos.
- La atenuación de la señal y su SNR son los factores principales para la lectura de las señales de los ecos. El eco recibido de la pared externa del tubo es ilegible comparado con los demás.
- A la entrada de un sistema de inferencia difuso es necesario utilizar las características de la señal de eco que no contengan redundancia de información. El análisis de componentes principales es la herramienta necesaria para filtrar estas variables.

El cuarto paso fue la simulación del sistema para determinar el perfil de la tubería. La grafica del perfil estuvo limitada por las siguientes condiciones:

- Está determinado sólo para las fisuras simuladas en este trabajo, no se generaliza para otros casos.
- No se puede hablar de un perfil de la tubería, sólo se genera una grafica que determina si hay fisura de un tamaño determinado.

El quinto paso fue el estudio de la viabilidad del uso de ondas guiadas de ultrasonido. La deducción de éste paso es:

- Las ondas normales a la superficie del sensor presentan mayor velocidad y cobertura que las ondas guiadas.

El sexto paso fue el estudio del movimiento longitudinal de los sensores en la tubería. En este paso se presentaron las siguientes conclusiones:

- La velocidad de traslación del sistema es despreciable comparada a la velocidad del sonido en el agua y acero.
- No hay un efecto doppler considerable en la frecuencia de excitación.

Las condiciones necesarias para el funcionamiento del anillo de sensores de ultrasonido como un modulo del '*smart pig*' en tuberías de acero, con 12" de diámetro y agua en su interior son:

- Tuberías de diámetros constantes.
- Utilización de mínimo 64 sensores de ultrasonido.
- Distancia de los sensores a la pared del tubo 1cm, ya que a menores distancias menor atenuación.
- Uso de 64 sistemas de adquisición de datos con una frecuencia de 20Mhz.
- Electrónica de reducidas dimensiones.
- Sistema mecánico de traslación e inmersión.
- Odómetro en tuberías metálicas para dividir la distancia del desplazamiento en partes de 5mm.
- Sistema de navegación inercial para determinar las coordenadas del perfil de la tubería.
- Memoria con capacidad de 40,96GB por cada kilómetro de recorrido.

El valor de los 64 sensores de inmersión es \$51200000, éstos hacen que la implementación de éste sistema tenga un costo elevado.

BIBLIOGRAFIA

- [1] "En búsqueda de esquemas apropiados de participación del sector privado en el suministro de agua potable y saneamiento Experiencias recientes en América Latina". Instituto Mexicano de Tecnologías del Agua. México, 4-5 Septiembre 2008.
- [2] Superintendencia De Servicios Públicos Domiciliarios. "Estudio Sectorial Acueducto y Alcantarillado". Bogotá, D.C., Noviembre 2006.
- [3] Z. Huiping, S. Sha, T Jian. "Research on Ultrasonic Inspection of Pipeline Corrosion". Publicado 2007. IEEE International Conference on Control and Automation.
- [4] S. N. Sen. "Research Acoustics, waves and oscillations". Publicado 1990. Wiley. New York.
- [5] D. Cole, A. Sassano, V. Gibbs. "Ultrasound Physics and Technology: How, Why and When". Publicado 2009. Churchill Livingstone. Primera edición.
- [6] "Phased Array Testing: Basic Theory for Industrial Applications". Publicado 2010. Olympus NTD. Primera edición.
- [6] "Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications". Publicado 2004. Olympus NTD. Canada.
- [7] "Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications". Publicado 2007. Olympus NTD. Canada.
- [8] X. Suo, M. Li, C. Hou, "Application of Fuzzy Inference in the Confidence Analysis on the Sound Wave Data of Water Leakage". Publicado Nov, 2007. IEEE 8th International Conference on Electronic Measurement and Instruments. Vol 4. pp. 657-660.
- [9] F. Jian, Z. Huaguang, L. Derong, , "Applications of Fuzzy Decision-Making in Pipeline Leak Localization". Publicado Jul 2004. IEEE international conference on fuzzy systems. Budapest, Hungria. Vol.2. pp 617- 622.
- [10] L. Xiuhe, S. Yingjun, Z. Jinzhu. "A Pipeline Leakage Detection Technology based on Wavelet Transform Theory". Publicado Ago 2006. IEEE International Conference on Information Acquisition. Weihai, Shandong, China. pp 1432-1437.
- [11] D. Grimaldi. "Time-of-Flight Measurement of Ultrasonic Pulse Echoes Using Wavelet Networks". Publicado Feb 2006. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. Vol 55. No 1.
- [12] M. Behnam, A. Sadr, A. Hossein. " Design of Optimum Wavelet for Noise Suppression and Its Application to Ultrasonic Echo Delay Estimation". Publicado Nov 2007. IEEE International Conference on Signal Processing and Communications.
- [13] K. Honda, A. Notsu, H. Ichihashi. "Fuzzy PCA-guided robust k-means clustering". Publicado Feb 2010. Piscataway, NJ, USA. IEEE Transactions on Fuzzy Systems archive. Vol 18.
- [14] C.X. Miao, Y.H. Zhang, J.Q. Ming. "A SVM Classifier Combined with PCA for Ultrasonic Crack Size Classification". Publicado 2008. IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering.

- [15] "Specifications and requirements for intelligent pig inspection of pipelines". Publicado 2009. Pipeline Operator Forum, Shell International Exploration and Production.
- [16]T. Bubenik, J. B. Nestleroth, B. Leis. "Introduction to Smart Pigging in Natural Gas Pipelines". Publicado Dic 2000. The Gas Research Institute.
- [17]T. Guibin, Z. Shimin, Z. Xiaoxiao, S. Liyun. "Research on Bypass-valve and its Resistance Characteristic of Speed Regulating PIG in Gas Pipeline". Publicado 2011. Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA). Shangshai.

ANEXO A. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL PIEZOELÉCTRICO TC3027.



- Side lobe suppression better than -23dB
- Small compact housing
- Ideal for watertight installation, due two double o-ring seal.

TC3027

The TC3027 is a Universal 1MHz transducer ideal for sound velocity measurements and short range applications.

TECHNICAL SPECIFICATIONS

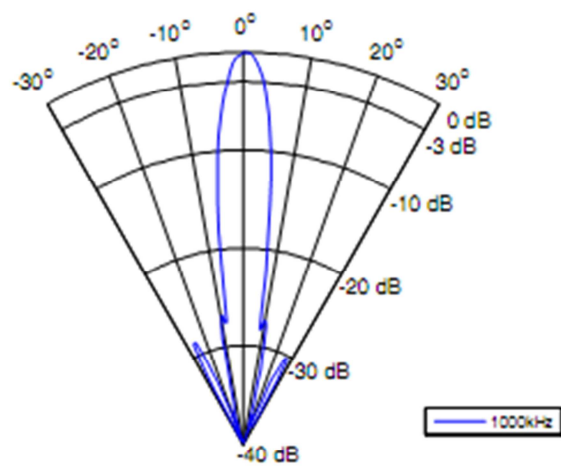
Resonant Frequency:	1MHz
Transmitting Sensitivity:	170dB \pm 3dB at 1MHz (re 1 μ Pa/V at 1m)
Receiving Sensitivity:	-201B \pm 3dB at 1MHz (re 1V/ μ Pa)
Impedance:	140ohm \pm 30 % at 1MHz
Directivity Pattern:	5.8°
Beam shape:	Conical
Side lobe Suppression:	Better than -23dB
Max input power: (1% duty cycle)	10W
Operating depth:	500m
Survival depth:	800m
Operating temperature range:	-2°C to +50°C
Storage temperature range:	-30°C to +50°C
Cable: (Length and type)	1.5m coax cable RG174/u, pigtail
Housing:	PVC - black
Weight (air) incl. cable:	40g



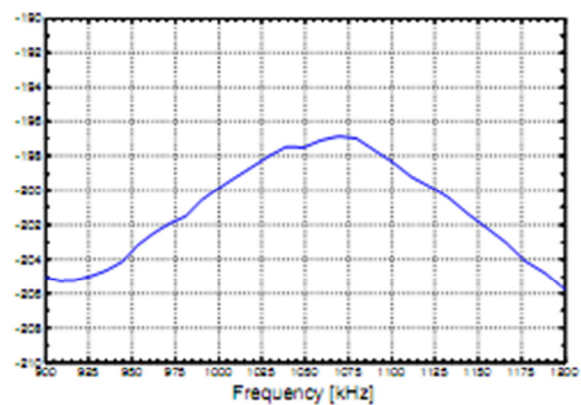
Transducer TC3027

Universal 1MHz Transducer

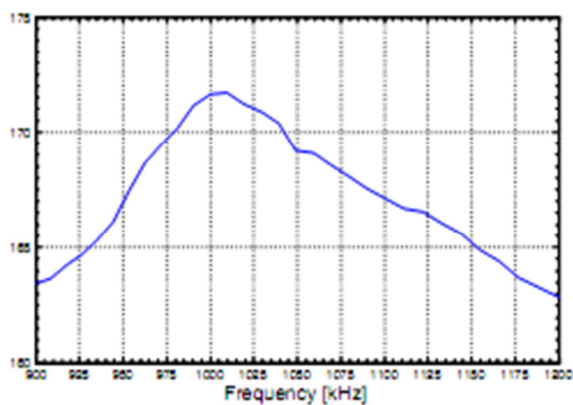
Horizontal directivity pattern



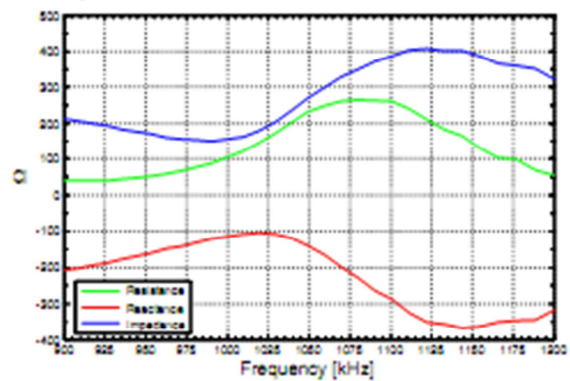
Receiving sensitivity



Transmitting sensitivity



Impedance



ANEXO B. ALGORITMO PARA OBTENER LAS GRÁFICAS DE DIRECTIVIDAD.

```

ce='0Lineaextrusióncubo.txt';
q='15Lineaextrusióncubo.txt';
t='30Lineaextrusióncubo.txt';
cu='45Lineaextrusióncubo.txt';
ses='60Lineaextrusióncubo.txt';
set='75Lineaextrusióncubo.txt';
n='90Lineaextrusióncubo.txt';
A =[load(ce),load(q),load(t),load(cu),load(ses),load(set),load(n)];
long=length(A);
for i=1:7

    for j=1:long

        if (A(j,(4*i)-3)<(0,002) && A(j,(4*i))>0);
            prim(j,i)=A(j,(4*i));
        elseif ((A(j,4*i-3)<0,004) && (A(j,4*i-3)>0,002) && A(j,(4*i))>0);
            sec(j,i)=A(j,(4*i));
        elseif ((A(j,4*i-3)<0,006) && (A(j,4*i-3)>0,004)&& A(j,(4*i))>0);
            ter(j,i)=A(j,(4*i));
        elseif ((A(j,4*i-3)<0,008) && (A(j,4*i-3)>0,006) && A(j,(4*i))>0 );
            quart(j,i)=A(j,(4*i));
        elseif ((A(j,4*i-3)<0,01) && (A(j,4*i-3)>0,008) && A(j,(4*i))>0);
            quin(j,i)=A(j,(4*i));
        elseif((A(j,4*i-3)<0,012) && (A(j,4*i-3)>0,01) && A(j,(4*i))>0);
            sex(j,i)=A(j,(4*i));
        elseif((A(j,4*i-3)<0,014) && (A(j,4*i-3)>0,012) && A(j,(4*i))>0);
            sep(j,i)=A(j,(4*i));
        elseif((A(j,4*i-3)<0,016) && (A(j,4*i-3)>0,014) && A(j,(4*i))>0);
            oct(j,i)=A(j,(4*i));
        elseif((A(j,4*i-3)<0,018) && (A(j,4*i-3)>0,016) && A(j,(4*i))>0);
            nov(j,i)=A(j,(4*i));
        elseif((A(j,4*i-3)<0,02) && (A(j,4*i-3)>0,018) && A(j,(4*i))>0);
            dec(j,i)=A(j,(4*i));

        end
    end

    ang(i,1)=(i-1)*(pi/12);
    X(i,1)=mean(prim(:,i))/67198,345;
    X(i,2)=mean(sec(:,i))/67198,345;
    X(i,3)=mean(ter(:,i))/67198,345;
    X(i,4)=mean(quart(:,i))/67198,345;
    X(i,5)=mean(quin(:,i))/67198,345;
    X(i,6)=mean(sex(:,i))/67198,345;
    X(i,7)=mean(sep(:,i))/67198,345;
    X(i,8)=mean(oct(:,i))/67198,345;
    X(i,9)=mean(nov(:,i))/67198,345;
    X(i,10)=mean(dec(:,i))/67198,345;

end

for i=1:6
    ang(i+7,1)=i*(pi/12)+pi/2;
    X(i+7,1)=X(7-i,1);
    X(i+7,2)=X(7-i,2);
    X(i+7,3)=X(7-i,3);
    X(i+7,4)=X(7-i,4);
    X(i+7,5)=X(7-i,5);
    X(i+7,6)=X(7-i,6);
    X(i+7,7)=X(7-i,7);
    X(i+7,8)=X(7-i,8);
    X(i+7,9)=X(7-i,9);
    X(i+7,10)=X(7-i,10);
end

figure
subplot(1,5,1); polar(ang,X(:,1))
title('0 A 0,002')

```

```

subplot(1,5,2); polar(ang,X(:,2))
title('0,002 A 0,004')
subplot(1,5,3); polar(ang,X(:,3))
title('0,004 A 0,006')
subplot(1,5,4); polar(ang,X(:,4))
title('0,006 A 0,08')
subplot(1,5,5); polar(ang,X(:,5))
title('0,08 A 0,01')

```

figure

```

subplot(1,5,1); polar(ang,X(:,6))
title('0,01 A 0,012')
subplot(1,5,2); polar(ang,X(:,7))
title('0,012 A 0,014')
subplot(1,5,3); polar(ang,X(:,8))
title('0,014 A 0,016')
subplot(1,5,4); polar(ang,X(:,9))
title('0,016 A 0,018')
subplot(1,5,5); polar(ang,X(:,9))
title('0,018 A 0,02')

```

```

deb=zeros(1,6);
for i=1:6
    c=trapz(ang,X(:,i));
    r(i)=[max(X(:,i))];
    b(1:13)=r(i);
    d=trapz(ang,b);
    FD(i)=c/d;
    deb(i)= 20*log10((r(i))/(3,608002460945949e+10));
end

```

ANEXO C. ALGORITMO PARA OBTENER LOS TIEMPOS DE ACTIVACIÓN DE CADA PIEZOELÉCTRICO.

```
d=0,0007; 'Distancia entre piezoeléctricos';
lf=0,04; 'Longitud focal';
teta=pi/2;
alpha=pi/2;
C=3250; 'Velocidad del sonido del material';
N=20; 'Numero de piezoeléctricos en una fila';
T=zeros(N);
Dz=0;
j=1;
for i=1:N
    Dx=(i-(N+1)/2)*d;
    T(j,i)=(lf-(Dx^2+ lf^2+ Dz^2 - 2*lf*(Dx*cos(teta)* sin(alpha)+Dz*cos(alpha)))^0,5)/C;
end
t0= min(min(T));
for i=1:N
    T(j,i)=T(j,i)-t0;
end
```

ANEXO D. CÓDIGO PARA LA EXTRACCIÓN DE RUIDO DE LA SEÑAL.

```
Continue on to
load('tiempo')
r=randn(401,1);
% con=con/67198.345;
e= awgn(con,80,'measured');
figure
plot(e) % Plot both signals.
legend('Original signal');
% [XD,CXD,LXD] = wden(X,TPTR,SORH,SCAL,N,'wname')
[c,l] = wavedec(e,5,'sym8');
xd = wden(c,l,'minimaxi','s','sln',5,'sym8');
figure
plot(xd) % Plot both signals.
legend('Señal con transformada discreta wavelet');
```

ANEXO E. CÓDIGO PARA LA EXTRACCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS ECOS.

```

eco=xd(1:45);
Y=xcorr(eco,xd);
R=Y(1:400);
Rrx=flipplr(R');
Rrx=Rrx';
Rrx=abs(Rrx);
figure
plot(Rrx, 'DisplayName', 'eco', 'YDataSource', 'eco');
legend('Señal con correlacion')
% corr=decimate(corr,2);
fh =envelope2(Rrx);
figure
plot(tiempo,fh, 'DisplayName', 'envolvente', 'YDataSource', 'eco'); figure(gcf)
xlabel('Tiempo')
ylabel('Presión')
legend('Señal con envolvente')
figure
plot(fh, 'DisplayName', 'envolvente', 'YDataSource', 'eco'); figure(gcf)
legend('Señal recortada');

der=diff(fh);
figure
plot(der, 'DisplayName', 'envolvente', 'YDataSource', 'eco'); figure(gcf)
legend('Derivada de la señal recortada')
ind=zeros(1,400);
for i=2:length(der)
if ((der(i)>0)&&(der(i-1)<=0)) || (i==399))
ind(i)=1;
end
end

indi=find(ind);

indil(1)=236;
indil(3)=399;
indil(2)=343;

figure
plot(ind, 'DisplayName', 'envolvente', 'YDataSource', 'eco'); figure(gcf)
title('Señal segmentada')
tmax=zeros(1,length(indil-1));
amax=zeros(1,length(indil-1));
area=zeros(1,length(indil-1));
tmed=zeros(1,length(indil-1));
areamedbajo=zeros(1,2);
areamedalto=zeros(1,2);
centroidebajo=zeros(1,2);
centroidealto=zeros(1,2);

for i=2:1:length(indil)
X=indil(i-1):1:indil(i);
[C,I]=max(fh(X));
tmax(i-1)=(I+indil(i-1))*5.000000000000000e-08;
amax(i-1)=C;
area(i-1)=trapz(X,fh(X));
tmed(i-1)=round((indil(i)-indil(i-1))/2+indil(i-1));
r1=fh(indil(i-1):1:tmed(i-1));
areamedbajo(i-1)=trapz(r1);
r2=fh(tmed(i-1):1:indil(i));
areamedalto(i-1)=trapz(r2);
centroi=0;
for j=indil(i-1):tmed(i-1);
centroi=centroi+j*fh(j);
end
centroidebajo(i-1)=(centroi/areamedbajo(i-1))*5.000000000000000e-08;
centro=0;
for k=tmed(i-1):indil(i);
centro=centro+k*fh(k);

```

```
end
centroidealto(i-1)=(centro/areamedalto(i-1))*5.000000000000000e-08;
end
```

ANEXO F. MATRIZ DE CARACTERÍSTICAS DE CADA CATEGORÍA DE SALIDA

	'Ampm ax1'	'Areamed alto1'	'Areamed bajo1'	'Centroi de11'	'Centroi de12'	'Tamp max1'	'Ampm ax2'	'Areamed alto2'	'Areamed bajo2'	'Centroi de21'	'Centroi de22'	'Tamp max2'
'Sin fisura'	32300 0000	4180000 000	9150000 000	1,36E- 05	1,57E- 05	1,36E- 05	30300 000	1660000 00	6060000 00	1,82E- 05	1,96E- 05	1,78E- 05
'Fisura_int 1cm'	60200 0000	1920000 0000	3070000 000	1,42E- 05	1,62E- 05	1,62E- 05	28200 0000	7850000 00	4010000 000	1,84E- 05	1,98E- 05	1,72E- 05
'Fisura_ce ntro1cm'	35300 0000	4060000 000	9530000 000	1,35E- 05	1,57E- 05	1,36E- 05	22200 000	9130000 0	5160000 00	1,83E- 05	1,99E- 05	1,77E- 05
'Fisura_ext 1cm'	35500 0000	4930000 000	1080000 0000	1,36E- 05	1,58E- 05	1,37E- 05	30100 000	1600000 00	5150000 00	1,87E- 05	1,99E- 05	1,72E- 05
'Fisura_int 2cm'	52300 0000	1550000 0000	1390000 000	1,33E- 05	1,64E- 05	1,62E- 05	34900 0000	8810000 00	5350000 000	1,84E- 05	1,99E- 05	1,72E- 05
'Fisura_ce ntro2cm'	44800 0000	4910000 000	1120000 0000	1,36E- 05	1,58E- 05	1,37E- 05	31300 000	1860000 00	4290000 00	1,85E- 05	1,95E- 05	1,72E- 05
'Fisura_ext 2cm'	38700 0000	3090000 000	9630000 000	1,35E- 05	1,58E- 05	1,37E- 05	22800 000	1090000 00	2270000 00	1,87E- 05	1,95E- 05	1,72E- 05
'Fisura_int 4cm'	40300 0000	1290000 0000	1430000 000	1,36E- 05	1,65E- 05	1,61E- 05	32300 0000	1280000 000	4840000 000	1,84E- 05	1,97E- 05	1,72E- 05
'Fisura_ce ntro4cm'	35400 0000	4110000 000	9540000 000	1,35E- 05	1,57E- 05	1,36E- 05	23500 000	8480000 0	5120000 00	1,83E- 05	1,99E- 05	1,77E- 05
'Fisura_ext 4cm'	35000 0000	4820000 000	1080000 0000	1,36E- 05	1,58E- 05	1,36E- 05	34100 000	1560000 00	5110000 00	1,87E- 05	1,99E- 05	1,77E- 05

ANEXO G. CÓDIGO DE LOS PASOS PARA EL ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES.

```
Propiedades=[amax(1,1) areamedbajo(1,1) areamedalto(1,1) amax(1,2) areamedbajo(1,2) areamedalto(1,2)];  
load('caracteristicas')  
data=[data;Propiedades];  
stdr = std(data);  
sr = data./repmat(stdr,11,1);  
[coefs,scores,variances,t2] = princomp(sr);
```

ANEXO H. PARTES QUE INTERVIENEN EN LOS SISTEMAS DE INFERENCIA 'FUZZY'.

Conjunto Difuso

Un conjunto difuso es un conjunto que no está definido claramente, Puede contener elementos con sólo un grado parcial de pertenencia. Para entender lo que es un conjunto difuso se considerará la definición de un conjunto clásico. Un conjunto clásico es un contenedor que incluye o excluye cualquier elemento dado.

La siguiente declaración sienta las bases de la lógica difusa, “*En la lógica difusa, la verdad de cualquier enunciado se convierte en una cuestión de grado*”.

El razonamiento en la lógica difusa es sólo una cuestión de generalizar el conocido razonamiento booleano (sí o no). Si se le da a verdadero el valor numérico de 1 y a falso el valor numérico de 0 (bivalente), en la lógica difusa se permite valores intermedios entre 0 y 1 (multivariable).

Funciones de Relación

Una función de relación es una curva que define la forma en que cada punto del espacio de entrada se asigna un grado de pertenencia entre 0 y 1 a una categoría de la salida.

La función puede ser una curva arbitraria cuya forma se puede escoger en función de su conveniencia desde el punto de vista de: simplicidad y eficiencia, Si 'X' es el conjunto de disertación y sus elementos se denotan por 'x', entonces un conjunto difuso A se define como: $A = \{x, \mu_A(x) \mid x \in X\}$; donde $\mu_A(x)$ es llamada la función de pertenencia de x en A. Las gráficas de estas funciones se muestran en la figura 94, al lado izquierdo están las bivalentes y al derecho las multivalentes.

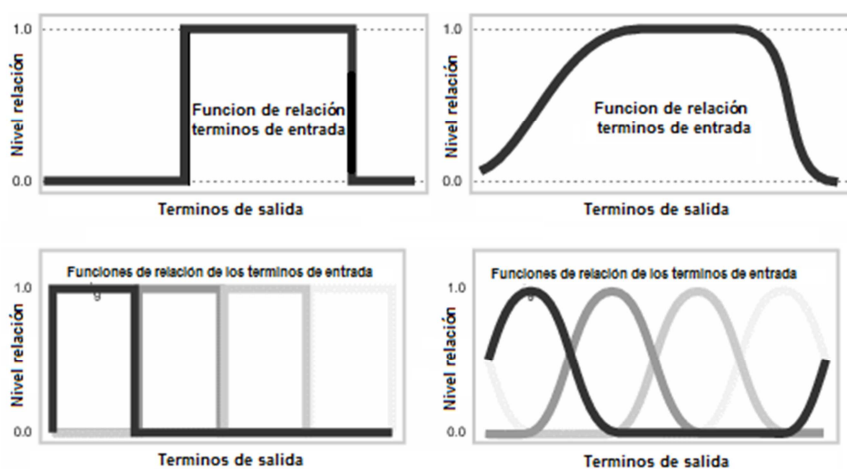


Figura 94. Funciones de pertenencia bivalente y multivalente.

Se ha escogido la función de pertenencia gaussiana, ya que tiene la mejor distribución de los datos, mayor suavidad y es distinta de cero en todos los puntos.

Operaciones Lógicas

Debido a que en la lógica difusa la verdad de cualquier afirmación es una cuestión de grado, las operaciones booleanas AND y OR son reemplazadas por las operaciones min, max o media. En la figura 95 se observan las operaciones aplicadas a las funciones bivalentes y a las funciones multivalentes.

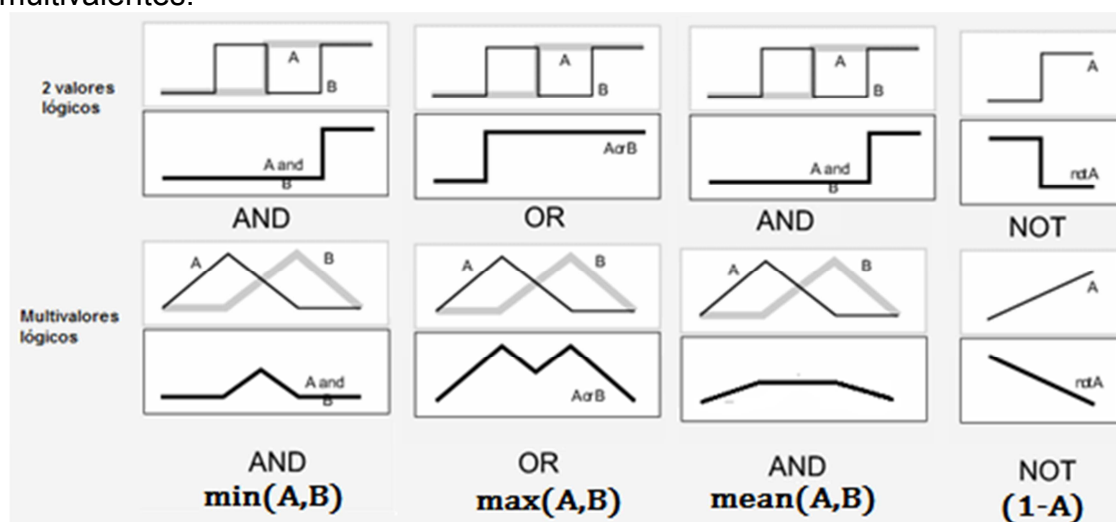


Figura 95. Operaciones lógicas para funciones de pertenencia bivalentes y multivalentes.

Se ha escogido la operación "mean" por ser un estadístico más completo.

Reglas

Los conjuntos y operadores difusos son los sujetos y los verbos de la lógica difusa, Las declaraciones 'si-entonces' son las reglas que se utilizan para formular las instrucciones condicionales que constituyen el sistema de inferencia.

Una sola regla 'si-entonces' asume la forma: 'si' x es A 'entonces' y es B, donde A y B son valores lingüísticos definidos por conjuntos difusos en los rangos X e Y, respectivamente. El 'si', parte de la regla "x es A", se llama el antecedente o premisa, mientras que el 'entonces', parte de la regla "y es B", se llama el consecuente o conclusión.

La suma de reglas de las variables de entrada tienen la siguiente estructura para la salida sin fisura:

```
If (amp is SINFISURA) and (AREAITO1 is SIN_FISURA) and (AREABAJO1 is SIN_FISURA)
and (AMP2 is SIN_FISURA) and (AREAITO2 is SIN_FISURA) and (AREABAJO2 is SIN_FISURA)
then (sal is SIN_FISURA)
```


Agregación de todas las salidas: Debido a que las decisiones se basan en las pruebas de todas las reglas en un FIS (Sistema de Inferencia fuzzy), las reglas deben ser combinadas de alguna manera con el fin de tomar una decisión. La agregación es el proceso mediante el cual los conjuntos difusos que representan las salidas de cada regla se combinan en un único conjunto difuso. La entrada del proceso de agregación es la lista de funciones de salida truncadas devueltas por el proceso de implicación de cada regla. La salida del proceso de agregación es un conjunto difuso para cada variable de salida. Se ha escogido la función 'max' para truncar las funciones de salida.

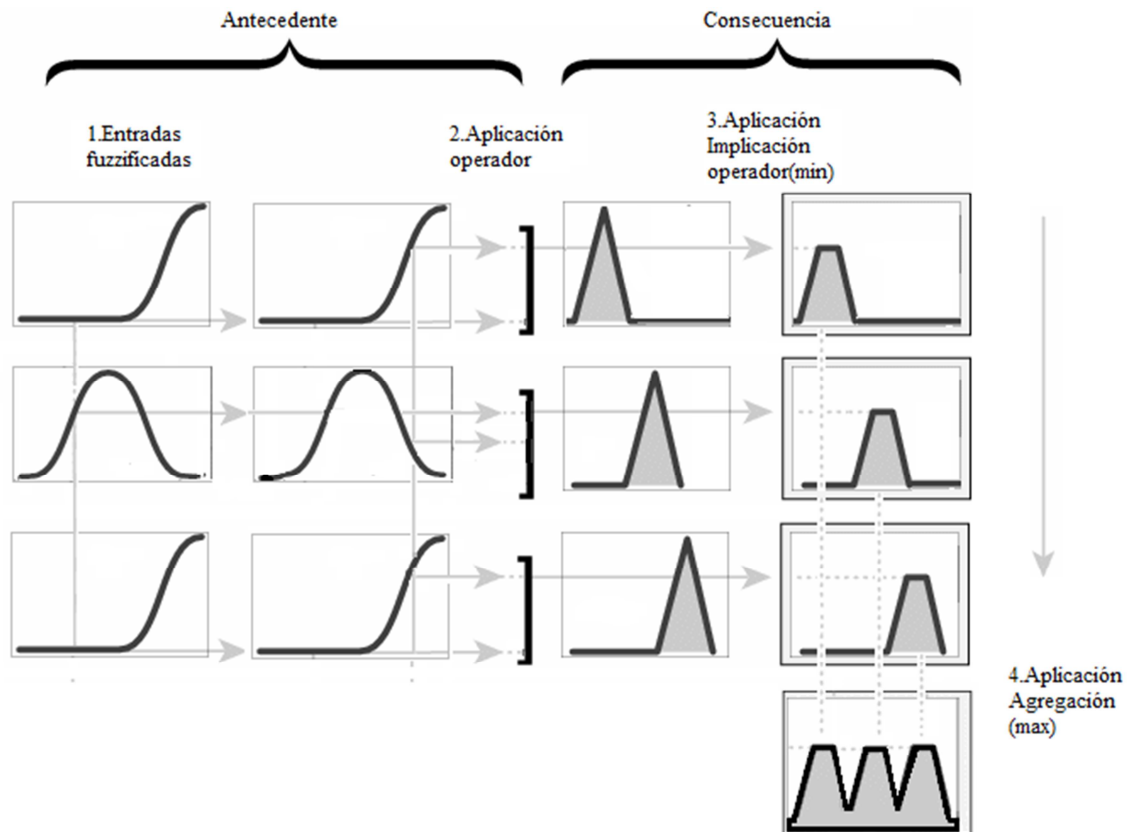


Figura 98. Proceso de agregación.

Defuzzificación: La entrada para el proceso de defuzzificación es el conjunto de la salida agregada y la salida es un número único. El resultado final deseado para cada variable es generalmente un solo número. Sin embargo, la suma de un conjunto difuso abarca una gama de valores de salida, y por lo tanto debe ser defuzzificado con el fin de resolver con un solo valor de salida. Hay cinco métodos de defuzzificación: centroide, biselector, la media del valor máximo de la salida del sistema, el mayor valor del máximo y el menor valor del máximo.

ANEXO I. CÓDIGO PARA LA CLASIFICACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS ECOS.

```
a=newfis('clasificacion2');
a.type=('mamdani');
a.andMethod=('mean');
a.orMethod=('max');
a.defuzzMethod=('mom');
a.impMethod=('min');
a.aggMethod=('max');

minimo=min(scores(:,1));
maximo=max(scores(:,1));
dist=abs(maximo-minimo)/10;
a=addvar(a,'input','PCA1',[minimo maximo]);
a=addmf(a,'input',1,'SINFISURA','gaussmf',[dist scores(1,1)]);
a=addmf(a,'input',1,'Fisura-superficial-interna-y-ancho-o-alto-menor-a-1cm','gaussmf',[dist scores(2,1)]);
a=addmf(a,'input',1,'Fisura-interior-y-ancho-o-alto-menor-a-1cm','gaussmf',[dist scores(3,1)]);
a=addmf(a,'input',1,'Fisura-superficial-externa-y-ancho-o-alto-menor-a-1cm','gaussmf',[dist scores(4,1)]);
a=addmf(a,'input',1,'Fisura-superficial-interna-y-ancho-o-alto-entre-1-a-2-cm','gaussmf',[dist scores(5,1)]);
a=addmf(a,'input',1,'Fisura-interna-y-ancho-o-alto-entre-1-a-2-cm','gaussmf',[dist scores(6,1)]);
a=addmf(a,'input',1,'Fisura-superficial-externa-y-ancho-o-alto-entre-1-a-2cm','gaussmf',[dist scores(7,1)]);
a=addmf(a,'input',1,'Fisura-superficial-interna-y-ancho-o-alto-entre-2-a-4-cm','gaussmf',[dist scores(8,1)]);
a=addmf(a,'input',1,'Fisura-interior-y-ancho-o-alto-entre-2-a-4cm','gaussmf',[dist scores(9,1)]);
a=addmf(a,'input',1,'Fisura-superficial-externa-y-ancho-o-alto-entre-2-a-4-cm','gaussmf',[dist scores(10,1)]);

minimo=min(scores(:,2));
maximo=max(scores(:,2));
dist=abs(maximo-minimo)/10;
a=addvar(a,'input','PCA2',[minimo maximo]);
a=addmf(a,'input',2,'SINFISURA','gaussmf',[dist scores(1,2)]);
a=addmf(a,'input',2,'Fisura-superficial-interna-y-ancho-o-alto-menor-a-1cm','gaussmf',[dist scores(2,2)]);
a=addmf(a,'input',2,'Fisura-interior-y-ancho-o-alto-menor-a-1cm','gaussmf',[dist scores(3,2)]);
a=addmf(a,'input',2,'Fisura-superficial-externa-y-ancho-o-alto-menor-a-1cm','gaussmf',[dist scores(4,2)]);
a=addmf(a,'input',2,'Fisura-superficial-interna-y-ancho-o-alto-entre-1-a-2-cm','gaussmf',[dist scores(5,2)]);
a=addmf(a,'input',2,'Fisura-interna-y-ancho-o-alto-entre-1-a-2-cm','gaussmf',[dist scores(6,2)]);
a=addmf(a,'input',2,'Fisura-superficial-externa-y-ancho-o-alto-entre-1-a-2cm','gaussmf',[dist scores(7,2)]);
a=addmf(a,'input',2,'Fisura-superficial-interna-y-ancho-o-alto-entre-2-a-4-cm','gaussmf',[dist scores(8,2)]);
a=addmf(a,'input',2,'Fisura-interior-y-ancho-o-alto-entre-2-a-4cm','gaussmf',[dist scores(9,2)]);
a=addmf(a,'input',2,'Fisura-superficial-externa-y-ancho-o-alto-entre-2-a-4-cm','gaussmf',[dist scores(10,2)]);

minimo=min(scores(:,3));
maximo=max(scores(:,3));
dist=abs(maximo-minimo)/10;
a=addvar(a,'input','PCA3',[minimo maximo]);
a=addmf(a,'input',3,'SINFISURA','gaussmf',[dist scores(1,3)]);
a=addmf(a,'input',3,'Fisura-superficial-interna-y-ancho-o-alto-menor-a-1cm','gaussmf',[dist scores(2,3)]);
a=addmf(a,'input',3,'Fisura-interior-y-ancho-o-alto-menor-a-1cm','gaussmf',[dist scores(3,3)]);
a=addmf(a,'input',3,'Fisura-superficial-externa-y-ancho-o-alto-menor-a-1cm','gaussmf',[dist scores(4,3)]);
```

```

a=addmf(a,'input',3,'Fisura-superficial-interna-y-ancho-o-alto-entre-1-a-2-
cm','gausmf',[dist scores(5,3)]);
a=addmf(a,'input',3,'Fisura-interna-y-ancho-o-alto-entre-1-a-2-cm','gausmf',[dist
scores(6,3)]);
a=addmf(a,'input',3,'Fisura-superficial-externa-y-ancho-o-alto-entre-1-a-
2cm','gausmf',[dist scores(7,3)]);
a=addmf(a,'input',3,'Fisura-superficial-interna-y-ancho-o-alto-entre-2-a-4-
cm','gausmf',[dist scores(8,3)]);
a=addmf(a,'input',3,'Fisura-interior-y-ancho-o-alto-entre-2-a-4cm','gausmf',[dist
scores(9,3)]);
a=addmf(a,'input',3,'Fisura-superficial-externa-y-ancho-o-alto-entre-2-a-4-
cm','gausmf',[dist scores(10,3)]);

a=addvar(a,'output','sal',[0 1]);
a=addmf(a,'output',1,'SIN_FISURA','trimf',[0 0.05 0.1 0]);
a=addmf(a,'output',1,'Fisura-superficial-interna-y-ancho-o-alto-menor-a-
1cm','trimf',[0.1 0.15 0.19 0]);
a=addmf(a,'output',1,'Fisura-interior-y-ancho-o-alto-menor-a-1cm','trimf',[0.2 0.25 0.29
0]);
a=addmf(a,'output',1,'Fisura-superficial-externa-y-ancho-o-alto-menor-a-
1cm','trimf',[0.3 0.35 0.39 0]);
a=addmf(a,'output',1,'Fisura-superficial-interna-y-ancho-o-alto-entre-1-a-
2cm','trimf',[0.4 0.45 0.49 0]);
a=addmf(a,'output',1,'Fisura-interna-y-ancho-o-alto-entre-1-a-2-cm','trimf',[0.5 0.55
0.59 0]);
a=addmf(a,'output',1,'Fisura-superficial-externa-y-ancho-o-alto-entre-1-a-2-
cm','trimf',[0.6 0.65 0.69 0]);
a=addmf(a,'output',1,'Fisura-superficial-interna-y-ancho-o-alto-entre-2-a-4-
cm','trimf',[0.7 0.75 0.79 0]);
a=addmf(a,'output',1,'Fisura-interior-y-ancho-o-alto-entre-2-a-4cm','trimf',[0.8 0.85
0.89 0]);
a=addmf(a,'output',1,'Fisura-superficial-externa-y-ancho-o-alto-entre-2-a-
4cm','trimf',[0.9 0.95 1 0]);

ruleList=[ ...
1 1 1 1 1 1
2 2 2 2 1 1
3 3 3 3 1 1
4 4 4 4 1 1
5 5 5 5 1 1
6 6 6 6 1 1
7 7 7 7 1 1
8 8 8 8 1 1
9 9 9 9 1 1
10 10 10 10 1 1
];
a=addrule(a,ruleList);
figure
plotfis(a)
for x=1:3
    figure
    plotmf(a,'input',x)
end
figure
plotmf(a,'output',1)
sall=evalfis([scores(11,1) scores(11,2) scores(11,3)], a);

if(sall>=0 && sall<0.1)
    disp('Sin fisura')
elseif(sall>=0.1 && sall<0.2)
    disp('Fisura-superficial-interna-y-ancho-o-alto-menor-a-1cm')
elseif(sall>=0.2 && sall<0.3)
    disp('Fisura-interior-y-ancho-o-alto-menor-a-1cm')
elseif(sall>=0.3 && sall<0.4)
    disp('Fisura-superficial-externa-y-ancho-o-alto-menor-a-1cm')
elseif(sall>=0.4 && sall<0.5)
    disp('Fisura-superficial-interna-y-ancho-o-alto-entre-1-a-2cm')
elseif(sall>=0.5 && sall<0.6)
    disp('Fisura-interna-y-ancho-o-alto-entre-1-a-2-cm')
elseif(sall>=0.6 && sall<0.7)
    disp('Fisura-superficial-externa-y-ancho-o-alto-entre-1-a-2-cm')

```

```
elseif(sall>=0.7 && sall<0.8)
    disp('Fisura-superficial-interna-y-ancho-o-alto-entre-2-a-4-cm')
elseif(sall>=0.8 && sall<0.9)
    disp('Fisura-interior-y-ancho-o-alto-entre-2-a-4cm')
else
    disp('Fisura-superficial-externa-y-ancho-o-alto-entre-2-a-4-cm')
end
```

ANEXO J. CÓDIGO PARA LA GENERACIÓN DEL PERFIL DE LA TUBERÍA.

```

theta=meshgrid([0:pi/200:pi/2]);
RHO2=meshgrid(ones(1,101));
RHO2=RHO2.*0.15;
r=zeros(101,101);
for i=1:101
for j=1:101
    r(i,j)=i/1000;
end
end
X2=RHO2.*cos(theta);
Y2=RHO2.*sin(theta);
RHO=meshgrid(ones(1,101));
RHO=RHO.*0.16;
X=RHO.*cos(theta);
Y=RHO.*sin(theta);
n=(1:5);
p=[0 2 5 8 10];
q=p/1000;
theta0=ones(5,2);
thet=zeros(101,101,2,5);
RHO4=ones(101,101,2,5);
X4=ones(101,101,2,5);
Y4=ones(101,101,2,5);
for j=1:5
if p(j)~=10
for i=1:2
    theta0(j,i)=(0.01/(0.15+q(j)+(0.002*(i-1))));
    thet(:,:,i,j)=meshgrid(((pi/18)*(n(j)-1)+(5*pi/180)-
(theta0(j,i)/2):theta0(j,i)/100:((pi/18)*(n(j)-1)+(5*pi/180)+(theta0(j,i)/2)));
    RHO4(:,:,i,j)=RHO4(:,:,i,j).*(0.148+q(j)+0.002*(i));
    X4(:,:,i,j)=RHO4(:,:,i,j).*cos(thet(:,:,i,j));
    Y4(:,:,i,j)=RHO4(:,:,i,j).*sin(thet(:,:,i,j));
end
else
for i=1:2
    theta0(j,i)=(0.01/(0.15+q(j)+(0.002*(1-i))));
    thet(:,:,i,j)=meshgrid(((pi/18)*(n(j)-1)+(5*pi/180)-
(theta0(j,i)/2):theta0(j,i)/100:((pi/18)*(n(j)-1)+(5*pi/180)+(theta0(j,i)/2)));
    RHO4(:,:,i,j)=RHO4(:,:,i,j).*(0.15+q(j)+0.002*(1-i));
    X4(:,:,i,j)=RHO4(:,:,i,j).*cos(thet(:,:,i,j));
    Y4(:,:,i,j)=RHO4(:,:,i,j).*sin(thet(:,:,i,j));
end
end
end
r3=zeros(101,101);
for i=1:101
for j=1:101
    r3(i,j)=i/20000+0.0950;
end
end
plot3(X2,Y2,r,X,Y,r,X4(:,:,1,1),Y4(:,:,1,1),r3,X4(:,:,2,1),Y4(:,:,2,1),r3,X4(:,:,1,2),Y4
(:,:,1,2),r3,X4(:,:,2,2),Y4(:,:,2,2),r3,X4(:,:,1,3),Y4(:,:,1,3),r3,X4(:,:,2,3),Y4(:,:,2,
3),r3,X4(:,:,1,4),Y4(:,:,1,4),r3,X4(:,:,2,4),Y4(:,:,2,4),r3,X4(:,:,1,5),Y4(:,:,1,5),r3,X
4(:,:,2,5),Y4(:,:,2,5),r3,'Color',[.85 .85 .85],'LineWidth', 2);

```

ANEXO K. CÓDIGO DE LA FUNCIÓN GRAFICADORA DE LA FISURA EN LA TUBERÍA.

```

function[] = perfil(sal2)

theta=meshgrid(0:pi/200:pi/2);
RHO2=meshgrid(ones(1,101));
RHO2=RHO2.*0.15;
r=zeros(101,101);
for i=1:101
for j=1:101
    r(i,j)=i/1000;
end
end
X2=RHO2.*cos(theta);
Y2=RHO2.*sin(theta);
RHO=meshgrid(ones(1,101));
RHO=RHO.*0.16;
X=RHO.*cos(theta);
Y=RHO.*sin(theta);
theta0=ones(1,2);
thet=zeros(101,101,2);
RHO4=ones(101,101,2);
X4=ones(101,101,2);
Y4=ones(101,101,2);
r3=zeros(101,101);
for i=1:101
for j=1:101
    r3(i,j)=i/20000+0.0950;
end
end
if (sal2==2 || sal2==5 || sal2==8)
for i=1:2
    theta0(i)=((0.01*2^(((sal2+1)/3)-1))/(0.15+(0.002*(i-1))));
    thet(:,:,i)=meshgrid((pi/18)+(5*pi/180)-
(theta0(i)/2):theta0(i)/100:(pi/18)+(5*pi/180)+(theta0(i)/2));
    RHO4(:,:,i)=RHO4(:,:,i).*(0.148+0.002*(i));
    X4(:,:,i)=RHO4(:,:,i).*cos(thet(:,:,i));
    Y4(:,:,i)=RHO4(:,:,i).*sin(thet(:,:,i));
end
    plot3(X2,Y2,r,X,Y,r,X4(:,:,1),Y4(:,:,1),r3,X4(:,:,2),Y4(:,:,2),r3,'Color',[.85 .85
.85],'LineWidth', 2);

elseif(sal2==3 || sal2==6 || sal2==9)
for i=1:2
    theta0(i)=((0.01*2^(((sal2)/3)-1))/(0.15+0.004+(0.002*(i-1))));
    thet(:,:,i)=meshgrid((pi/18)+(5*pi/180)-
(theta0(i)/2):theta0(i)/100:(pi/18)+(5*pi/180)+(theta0(i)/2));
    RHO4(:,:,i)=RHO4(:,:,i).*(0.148+0.004+0.002*(i));
    X4(:,:,i)=RHO4(:,:,i).*cos(thet(:,:,i));
    Y4(:,:,i)=RHO4(:,:,i).*sin(thet(:,:,i));
end
    plot3(X2,Y2,r,X,Y,r,X4(:,:,1),Y4(:,:,1),r3,X4(:,:,2),Y4(:,:,2),r3,'Color',[.85 .85
.85],'LineWidth', 2);

elseif(sal2==4 || sal2==7 || sal2==10)
for i=1:2
    theta0(i)=((0.01*2^(((sal2-1)/3)-1))/(0.15+0.008+(0.002*(i-1))));
    thet(:,:,i)=meshgrid((pi/18)+(5*pi/180)-
(theta0(i)/2):theta0(i)/100:(pi/18)+(5*pi/180)+(theta0(i)/2));
    RHO4(:,:,i)=RHO4(:,:,i).*(0.15+0.008+0.002*(i-1));
    X4(:,:,i)=RHO4(:,:,i).*cos(thet(:,:,i));
    Y4(:,:,i)=RHO4(:,:,i).*sin(thet(:,:,i));
end
    plot3(X2,Y2,r,X,Y,r,X4(:,:,1),Y4(:,:,1),r3,X4(:,:,2),Y4(:,:,2),r3,'Color',[.85 .85
.85],'LineWidth', 2);
else
    plot3(X2,Y2,r,X,Y,r,'Color',[.85 .85 .85],'LineWidth', 2);
end
end

```