



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY



FACULTAD DE
INGENIERÍA
UDELAR

Desarrollo de una Herramienta de Visualización para la Inspección de Metales con Ultrasonido

Marcio Fabrizio Vacca Amado

Programa de Posgrado en Ingeniería Mecánica
Facultad de Ingeniería
Universidad de la República

Montevideo – Uruguay
Junio de 2025



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY



FACULTAD DE
INGENIERÍA
UDELAR

Desarrollo de una Herramienta de Visualización para la Inspección de Metales con Ultrasonido

Marcio Fabrizio Vacca Amado

Tesis de Maestría presentada al Programa de Posgrado en Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República, como parte de los requisitos necesarios para la obtención del título de Magíster en Ingeniería Mecánica.

Directores:

Dr. Ing. Gonzalo Cetrangolo

Dr. Ing. Agustin Spalvier

Montevideo – Uruguay

Junio de 2025

Vacca Amado, Marcio Fabrizio

Desarrollo de una Herramienta de Visualización para la Inspección de Metales con Ultrasonido / Marcio Fabrizio Vacca Amado. - Montevideo: Universidad de la República, Facultad de Ingeniería, 2025.

XIII, 90 p.: il.; 29, 7cm.

Directores:

Gonzalo Cetrangolo

Agustin Spalvier

Tesis de Maestría – Universidad de la República, Programa en Ingeniería Mecánica, 2025.

Referencias bibliográficas: p. 88 – 90.

1. END, 2. Ultrasonidos, 3. A-scan, 4. B-scan, 5. SAFT. I. Cetrangolo, Gonzalo, Spalvier, Agustin, . II. Universidad de la República, Programa de Posgrado en Ingeniería Mecánica. III. Título.

INTEGRANTES DEL TRIBUNAL DE DEFENSA DE TESIS

Dr. Prof. Nicolás Perez

Dr. Prof. Martin Duarte

Dr. Prof. Thomas Gallot

Montevideo – Uruguay
Junio de 2025

Agradecimientos

Quisiera agradecer a mis tutores Gonzalo, Alina y Agustín por su tiempo y dedicación hacia mi persona. Quiero destacar el buen ambiente de trabajo que siempre tuvimos en reuniones e instancias de laboratorio, lo cual hizo muy llevadero el desarrollo de esta tesis.

También agradezco el apoyo del IET por el acceso a su equipamiento y laboratorios, así como al IEM por impulsarme a realizar la maestría, brindarme los espacios y tiempos necesarios para el estudio.

Gracias a la empresa SIIT SERVICIOS INDUSTRIALES por posibilitar la realización de los ensayos de Rx.

Agradezco a Lidio, coordinador de la carrera de Tecnólogo Industrial Mecánico, por su acompañamiento y por impulsar el desarrollo del área de Ensayos No Destructivos dentro de la facultad.

Mi agradecimiento también a Claudia, bibliotecaria del IEM, siempre dispuesta a ofrecer su ayuda y valiosos consejos.

A mi familia y amigos, gracias por brindarme esas instancias no académicas pero fundamentales para sostener el ritmo de este tipo de actividad.

Por último, deseo agradecer a mi pareja, Anyela, por estar presente y quiero recordar que tiempo atrás, nos propusimos comenzar este viaje de la maestría, que hoy finaliza y marca el inicio de nuevas etapas.

RESUMEN

Los Ensayos No Destructivos (END) son ampliamente utilizados en la industria debido a su capacidad de evaluar la condición de un objeto sin interferir en su desempeño y sin causar daños sobre el mismo. Dentro de los diferentes métodos de END se encuentra el de Ultrasonidos (UT), este método ha evolucionado permitiendo la generación de imágenes ultrasónicas representativas de la pieza bajo estudio.

El objetivo primario de esta tesis es desarrollar una herramienta que permita la generación de imágenes ultrasónicas (B-scan) por medio de la adquisición de señales de un medidor de espesores ultrasónico, el cual no cuenta con dicha función. El objetivo secundario es mejorar las capacidades de detección de daños y defectos mediante la visualización mejorada a partir de un posprocesamiento.

Para lograr las metas planteadas se procedió a generar una derivación entre el equipo de UT y el transductor, en dicho punto se conecta un osciloscopio para realizar la adquisición de las señales y luego poder procesarlas.

Se logró realizar un mejoramiento de las señales A-scan adquiridas por medio de procesamiento sin el cual no sería posible utilizarlas para la inspección de materiales. Posteriormente se pudo generar la representación B-scan y su versión mejorada, en la cual se obtuvo un aumento del SNR y CNR, aparte de una reducción de las hipérbolas características de los B-scan. Se compararon los resultados obtenidos con los generados por un equipo comercial y con los resultados de un ensayo de Radiografía Industrial, demostrando que el procesamiento planteado mejora la visualización y permite identificar defectos de forma adecuada.

Palabras claves:

END, Ultrasonidos, A-scan, B-scan, SAFT.

Lista de figuras

1.1	Ensayo Visual.	3
1.2	Líquidos Penetrantes.	4
1.3	Partículas Magnetizables.	5
1.4	Radiografía Industrial.	6
1.5	Termografía Infrarroja.	7
2.1	Reflexión y Transmisión de onda (León, 2009).	13
2.2	Incidencia angular.	14
2.3	Patrón de radiación.	16
2.4	Campo ultrasónico.	17
2.5	Componentes del transductor.	21
2.6	Comparación entre señal original e interpolada.	23
2.7	Señal captada por un acelerómetro.	25
2.8	Análisis de frecuencias: se puede observar la frecuencia predominante de vibración en 0,5 Hz.	25
2.9	Filtrado de señales, a) señal original, b)señal filtrada adecuadamente, y c) señal filtrada de manera inadecuada.	26
2.10	SNR, a) señal sin ruido, y b) señal con ruido agregado.	27
2.11	Señal Ultrasónica.	28
2.12	Resultado de la correlación.	28
2.13	Envoltentes de una señal, a) señal original, b) envolvente superior, y c) envolvente inferior.	29
2.14	Apodización Hamming.	30
2.15	A-scan.	33
2.16	Generación de B-scan.	34
2.17	Inspección material compuesto, a) imagen digital, b) representación C-scan c) superposición de C-scan e imagen digital (Merino, 2009).	35

2.18	Técnica TOFD (Spies et al. 2012).	36
2.19	SAFT modo contacto (Stepinski, 2007a).	40
2.20	Hipérbolas en imágenes (Stepinski, 2007a).	41
2.21	Resolución Axial (Parrilla, 2004).	42
3.1	Esquema Experimental.	45
3.2	Montaje Experimental.	45
3.3	Probeta 1.	47
3.4	Probeta 2.	47
3.5	Probeta 3.	48
3.6	Longitud del pulso (ASTM, 1999).	50
3.7	Ancho de banda (ASTM, 1999).	50
3.8	Esquema de toma de señales.	51
3.9	Secuencia del procesamiento.	52
3.10	Suma ponderada	54
3.11	SNR y CNR.	56
3.12	Montaje para ensayo de Rx.	57
3.13	Propagación de Rx.	58
4.1	Ancho temporal del pulso ultrasónico.	60
4.2	Espectro de frecuencias del transductor.	61
4.3	Ecos de fondo sucesivos en A-scan.	62
4.4	Resultado de la correlación de ecos de fondo.	63
4.5	Señal A-scan con curva de atenuación ajustada.	63
4.6	Procesamiento parcial y total.	64
4.7	Señal A-scan pura.	66
4.8	Señal A-scan mejorada.	66
4.9	Representación B-scan sin procesamiento.	67
4.10	Representación B-scan.	67
4.11	Resultado del procesamiento total.	68
4.12	Comparación de señales A-scan.	68
4.13	Comparación imagen ultrasónica con digital.	69
4.14	B-scan probeta 2.	70
4.15	B-scan probeta 2 con procesamiento total.	70
4.16	Comparación de A-scan con diferente procesamiento.	71
4.17	B-scan probeta 3.	72
4.18	B-scan probeta 3 procesada totalmente.	72

4.19 B-scan probeta 3 procesada totalmente.	73
4.20 B-scan probeta 3.	74
4.21 B-scan procesado totalmente.	74
4.22 Comparación de A-scan con diferente procesamiento.	75
4.23 Medición de la discontinuidad.	75
4.24 Comparación de B-scan con placa Rx.	76
4.25 Comparación de B-scan obtenido con equipo comercial.	77
4.26 B-scan del lado cercano obtenido con equipo comercial.	78
4.27 B-scan del lado lejano obtenido con equipo comercial.	78
4.28 B-scan probeta 2 procesado totalmente.	79
4.29 B-scan probeta 3 obtenido con equipo comercial.	80
4.30 Placa radiográfica de la probeta 3.	80
4.31 Probeta 3 L1, L2, L3 y L4.	81
4.32 B-scan probeta 3 L1.	81
4.33 B-scan probeta 3 L2.	82
4.34 B-scan probeta 3 L3.	82
4.35 B-scan probeta 3 L4.	82
4.36 B-scan 360° probeta 3.	83
4.37 Comparación B-scan 360° con placa Rx.	83
4.38 B-scan obtenido con el GPR.	84
4.39 B-scan obtenido por procesamiento planteado.	85

Lista de tablas

2.1	Impedancia acústica.	13
2.2	Coefficientes de reflexión y transmisión.	13
2.3	Propiedades de materiales piezoeléctricos (León, 2009).	19
3.1	Parámetros de ensayo Rx	57
4.1	Características del Transductor.	61
4.2	Caracterización ultrasónica de los aceros.	63
4.3	Parámetros de ensayo.	65
4.4	Parámetros de ensayo.	70
4.5	Variación de SNR y CNR.	71
4.6	Parámetros de ensayo.	73

Tabla de contenidos

Lista de figuras	VII
Lista de tablas	X
1 Introducción	1
1.1 Ensayos No Destructivos	1
1.1.1 Ensayo Visual	2
1.1.2 Ultrasonidos	3
1.1.3 Líquidos Penetrantes	4
1.1.4 Partículas Magnetizables	5
1.1.5 Radiografía Industrial	6
1.1.6 Termografía Infrarroja	7
1.2 Objetivos	8
2 Marco teórico y antecedentes	9
2.1 Ondas	9
2.1.1 Ecuación de onda	9
2.1.2 Naturaleza y propiedades	10
2.1.3 Comportamiento de las ondas ultrasónicas en superficies límites	12
2.1.4 Campo ultrasónico	15
2.1.5 Atenuación de las ondas ultrasónicas	17
2.1.6 Generación y recepción de ondas ultrasónicas	18
2.1.7 Transductores	19
2.2 Procesamiento de Señales	21
2.2.1 Muestreo	21
2.2.2 Interpolación y condensación de datos	22
2.2.3 Promedio y valor medio	23

2.2.4	Ventana temporal	23
2.2.5	Detección de máximos o mínimos	24
2.2.6	Transformada Discreta de Fourier	24
2.2.7	Filtros	25
2.2.8	Relación Señal-Ruido	26
2.2.9	Correlación	27
2.2.10	Transformada de Hilbert y Envolvente	29
2.2.11	Amplificación	29
2.2.12	Apodización	30
2.3	Imágenes Ultrasónicas	31
2.3.1	Representaciones convencionales	31
2.3.2	Técnica de Enfoque de Apertura Sintética (SAFT)	36
2.3.3	Calidad de imágenes	43
3	Metodología Experimental y Procesamiento	44
3.1	Montaje Experimental	44
3.2	Caracterización del transductor y de las probetas de estudio	48
3.3	Análisis de probetas con reflectores	50
3.3.1	Procesamiento	51
3.3.2	Medición de SNR y CNR en imágenes B-scan	55
3.4	Comparación de resultados	56
3.4.1	Ensayo de Radiografía	57
3.4.2	Composición de B-scan 360°	58
3.4.3	Georadar	58
4	Presentación de Resultados, Análisis y Discusión	60
4.1	Caracterización del transductor Ultrasónico	60
4.2	Caracterización Ultrasónica de Probetas	62
4.3	Análisis de Probetas con Reflectores	64
4.3.1	Probeta 1	65
4.3.2	Probeta 2	69
4.3.3	Probeta 3	73
4.4	Comparación con otros Métodos o Equipos	76
4.4.1	Probeta 1	76
4.4.2	Probeta 2	77
4.4.3	Probeta 3	79

4.4.4	Georradar	84
5	Consideraciones finales	86
	Referencias bibliográficas	88

Capítulo 1

Introducción

En este capítulo se realiza una introducción global a los Ensayos No Destructivos y una presentación de los diferentes métodos más utilizados para la inspección de materiales metálicos, con la presentación de resultados específicos para cada uno de ellos.

La motivación personal para el desarrollo de este trabajo surge del interés en comprender los fenómenos físicos asociados a la propagación de ondas ultrasónicas en materiales sólidos y su aplicación en la evaluación no destructiva. En particular, el ultrasonido resulta atractivo por su capacidad de revelar información interna de los materiales a partir del análisis de señales. A su vez es un método de ensayo que esta en constante evolución.

1.1. Ensayos No Destructivos

La creación de industrias de gran envergadura, como la de generación de energía, el procesamiento de metales y la fabricación de automóviles, ha impulsado la adopción y desarrollo de los Ensayos No Destructivos (END). Estas técnicas y métodos END abarcan la radiografía, ultrasonidos, partículas magnéticas, líquidos penetrantes, corrientes inducidas, emisiones acústicas y termografía. El amplio uso de END está impulsado por la economía y la seguridad, en un intento preventivo de evitar los problemas asociados con el deterioro estructural (Shen, [2006](#)).

La Sociedad Estadounidense de Pruebas No Destructivas (ASNT) define los END como procesos para evaluar la condición física de un objeto sin interferir en su capacidad para desempeñar su función prevista.

Los END buscan posibles discontinuidades, tanto en la superficie del componente como en su interior, así como analizar o determinar sus características materiales. En esencia, se trata de un proceso de valoración y análisis basado en estándares, con el propósito de identificar y caracterizar defectos, sin alterar ni perjudicar el objeto bajo estudio (Dwivedi et al. [2018](#)).

La selección de un método de END implica varios pasos cruciales. En primer lugar, es esencial entender la naturaleza física y las propiedades del material que se va a inspeccionar. Luego, es necesario comprender los fenómenos físicos que rigen el método de ensayo en cuestión, esto implica entender cómo se comportarán las señales o respuestas del material bajo prueba.

La interacción entre la prueba y el material también se debe comprender, cada método tiene diferentes modos de interacción y puede proporcionar información específica sobre el material. Además, es importante reconocer las posibles limitaciones de la tecnología disponible. Ningún método es perfecto para todas las situaciones, por lo que es fundamental saber en qué condiciones el método es más efectivo y en cuáles podría tener limitaciones.

Además de estos factores técnicos, también es relevante considerar aspectos económicos, ambientales y normativos al seleccionar un método END. El costo de la implementación, el impacto en el medio ambiente y la conformidad con regulaciones y estándares específicos también desempeñan un papel importante en la elección del método adecuado.

En conjunto, estos pasos contribuyen a una selección eficiente del método de ensayo más adecuado para una situación dada, permitiendo una inspección precisa y confiable de los materiales y componentes sin comprometer su integridad ni funcionalidad (Helal et al. [2015](#)).

A continuación se describirán brevemente algunos de los métodos END.

1.1.1. Ensayo Visual

El ensayo Visual (VT) es uno de los métodos más utilizados, y se lleva a cabo mediante observación directa, ya sea a simple vista o con la ayuda de dispositivos auxiliares, para detectar defectos superficiales en los materiales inspeccionados. Su popularidad radica en su simplicidad, robustez y bajo costo, lo que permite una aplicación rápida y efectiva. Es fundamental llevar a cabo la inspección visual en un entorno limpio y con una iluminación adecuada, dado

que estos factores son esenciales para lograr resultados precisos y confiables. En la Figura 1.1 se puede apreciar la detección de *pitting* planar (corrosión) dentro de un tanque de combustibles detectado por VT.

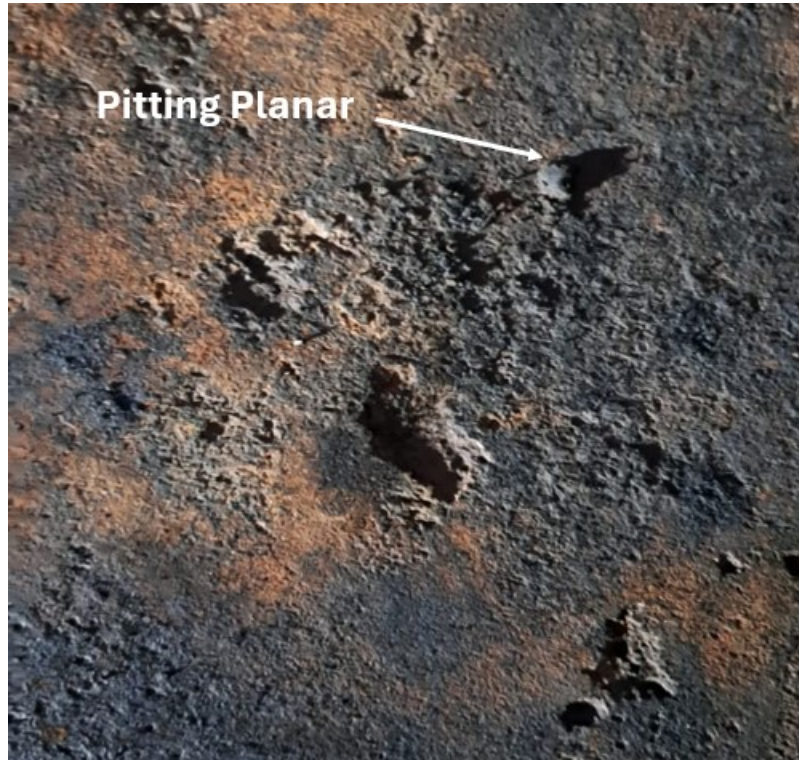


Figura 1.1: Ensayo Visual.

Para que el ensayo visual sea efectivo, el componente bajo inspección debe estar completamente limpio y libre de suciedad, así como de recubrimientos protectores, ya que estos pueden enmascarar las discontinuidades. Un ejemplo de aplicación de VT es la inspección de tuberías con un boroscopio, que permite la identificación de corrosión, picaduras o problemas en la raíz de la soldadura. Sin embargo, el ensayo visual tiene sus limitaciones, ya que principalmente se enfoca en la detección de discontinuidades en la superficie (Morcillo, 2011).

1.1.2. Ultrasonidos

El ensayo Ultrasonico (UT) es un método que se basa en la emisión de haces de ondas mecánicas de alta frecuencia, normalmente en el rango de 0,5 a 15 MHz, con el propósito de detectar y ubicar tanto discontinuidades superficiales como internas en materiales. Este método también se aplica para la caracterización de diversos tipos de materiales, se utilizan medios de acoplamiento como aceite

mineral, gel o agua para mejorar la transmisión de la energía acústica hacia la muestra bajo análisis. Los ultrasonidos son particularmente eficaces en la evaluación de ruedas de trenes de alta velocidad fabricadas con diferentes tipos de acero. En la industria marítima, se emplean para el control de calidad después de la soldadura manual, permitiendo detectar porosidades, inclusiones y otras discontinuidades (Kroworz y Katunin, [2018](#)).

1.1.3. Líquidos Penetrantes

El ensayo de Líquidos Penetrantes (PT) es un método que permite la detección de discontinuidades superficiales en materiales sólidos no porosos. La aplicación de este ensayo en comparación con otros métodos como Radiografía Industrial es menos compleja y se puede realizar con un equipamiento mínimo de bajo costo. Este ensayo radica su eficacia en la gran capacidad de penetración que tienen los líquidos penetrantes debido a sus características como por ejemplo su baja tensión superficial y en la capilaridad, fenómeno por el cual se hacen visibles las discontinuidades. En la Figura [1.2](#) se observan las indicaciones generadas al inspeccionar una cañería de acero inoxidable (AEND, [2009](#)).



Figura 1.2: Líquidos Penetrantes.

1.1.4. Partículas Magnetizables

El método de Partículas Magnetizables (MT) permite detectar discontinuidades superficiales y subsuperficiales. Se basa en la aplicación de un campo magnético sobre la pieza a ensayar a partir de diferentes técnicas de magnetización. En los lugares donde existan discontinuidades debido a la reluctancia magnética se formará un campo de fuga en el cual se acumularán las partículas magnetizables, siendo detectadas por medio de inspección visual. Este ensayo es común que se aplique en centros de rectificado de cigüeñales y árboles de levas, en la Figura 1.3 se observan las discontinuidades encontradas en la muñequilla de un cigüeñal (AEND, 2002).



Figura 1.3: Partículas Magnetizables.

1.1.5. Radiografía Industrial

El ensayo Radiográfico (RT) consiste en generar una imagen (placa radiográfica) de un objeto sobre una película fotosensibles por medio de la aplicación de radiaciones electromagnéticas. Estas son capaces de atravesar objetos opacos a la luz visible y generan reacciones químicas sobre los materiales fotosensibles. En la Figura 1.4 se observa la placa radiográfica realizada a un cupón de soldadura de dos tubos en una junta a tope para la calificación del procedimiento (SEF et al. 2013).



Figura 1.4: Radiografía Industrial.

1.1.6. Termografía Infrarroja

El ensayo Termografía Infrarroja (IT) es un método de análisis sin contacto que obtiene información térmica de un cuerpo a través de la radiación infrarroja que emite su superficie. Este método presenta grandes ventajas ya que el resultado del termograma es instantáneo y se puede realizar a distancia sin necesidad de tener contacto con el cuerpo de estudio, esto permite analizar componentes en movimiento. A continuación en la Figura 1.5 se puede observar el resultado del análisis termográfico realizado en la Facultad de Veterinaria de la UdelaR para la detección de cáncer de mama a un ejemplar canino (Soriano y Pastor, 2016).

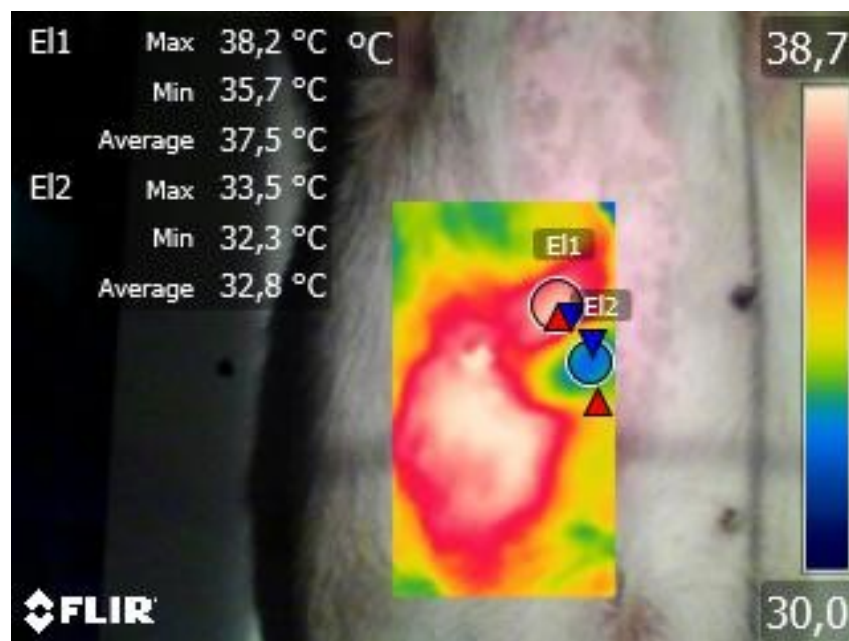


Figura 1.5: Termografía Infrarroja.

1.2. Objetivos

De manera general el método ultrasónico presentado [1.1.2](#) es uno de los cuales se puede aplicar en campos muy diversos de las distintas industrias por lo tanto está en constante desarrollo. Esta capacidad de crecimiento que presenta viene dado porque “el ultrasonido no es un invento, sino un evento físico natural que puede ser provocado por el hombre”. Esto nos da la posibilidad de captar y generar señales de diferentes características para su posterior interpretación (Águila et al. [2019](#)).

En esta tesis se profundizará sobre la temática mencionada, por medio de un análisis de sus principios físicos y principales características. A su vez se estudiarán las distintas formas de representación para las señales y diferentes tipos análisis y procesamiento de las mismas. Se pretende profundizar en el método de ultrasonido no solo a nivel de usuario, si no en un manejo más profundo el cual implica la instrumentación, adquisición y el procesamiento de las señales. La importancia de comprender el manejo de las señales radica en que estos mismos conocimientos son aplicables a otro tipo de señales.

El objetivo primario de esta tesis es desarrollar una herramienta que permita la generación de imágenes ultrasónicas por medio de la adquisición de señales de un medidor de espesores ultrasónico, el cual no cuenta con dicha función. El objetivo secundario es mejorar las capacidades de detección de daños y defectos mediante la visualización mejorada a partir de un posprocesamiento.

Capítulo 2

Marco teórico y antecedentes

En este capítulo se desarrolla un marco teórico de los fenómenos físicos, leyes que lo rigen y características propias del método no destructivo de Ultrasonido. A su vez se presentarán diferentes herramientas existentes para el procesamiento de señales de ultrasonido y las posibles formas de combinarlas para generar las diferentes representaciones posibles.

2.1. Ondas

Para analizar y entender los END de Ultrasonido desde un punto de vista tecnológico se ha utilizado el libro del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (Gómez, 1980) de Madrid, España y para comprender la física detrás del ultrasonido el libro Fundamentos de Acústica (Kinsler et al. 1988).

2.1.1. Ecuación de onda

Un caso simple para presentar la ecuación de onda es la propagación por una cuerda, según la coordenada espacial x y el desplazamiento transversal y de un elemento infinitesimal. La cual está estirada con una tensión T y tiene una densidad lineal ρ_L , del análisis teórico se obtiene la ecuación 2.1, siendo c^2 el cociente de la tensión y la densidad lineal.

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (2.1)$$

La solución más general para esta ecuación diferencial de segundo orden se presenta en la ecuación 2.2. Donde $y_1(ct - x)$ y $y_2(ct + x)$ son funciones arbi-

trarias con sus respectivos argumentos, los cuales implican el desplazamiento de la onda con una velocidad de fase c en el sentido positivo o negativo de la coordenada x respectivamente (Kinsler et al. 1988).

$$y(x, t) = y_1(ct - x) + y_2(ct + x) \quad (2.2)$$

2.1.2. Naturaleza y propiedades

Las ondas ultrasónicas son ondas acústicas de naturaleza elástica que operan a frecuencias superiores a 20 kHz (Veca y Accolti, 2016). Estas se pueden propagar en cualquier medio donde existan fracciones de materia, o sea átomos o moléculas que puedan vibrar. Las frecuencias utilizadas para el ensayo de materiales varían de frecuencias próximas al rango audible y llegan a 25 MHz. En la inspección de materiales metálicos las frecuencias utilizables varían entre 0,2 a 25 MHz.

A continuación se definen algunos parámetros importantes de las ondas:

- Frecuencia (f): es el número de oscilaciones de una partícula dada por segundo.
- Longitud de onda (λ): es la distancia entre dos planos en los que las partículas se encuentren en la misma fase. Es inversamente proporcional a la frecuencia en ausencia de dispersión.
- Velocidad acústica (C): es la velocidad de propagación de la onda para una condición dada, es una característica del material. Para algunos materiales sólidos como los metales se puede considerar como una constante del material para una condición definida.
- Amplitud de oscilación (A): es el apartamiento máximo de una partícula respecto a su posición cero.
- Presión acústica (p): en la regiones de gran concentración de partículas, zonas de compresión, la presión es mayor que en el resto de las regiones.
- Impedancia acústica (Z): es la relación entre la presión acústica y la velocidad máxima de vibración, se calcula como el producto de la densidad y la velocidad. Es el parámetro que define la transmisión y la reflexión de ondas. En el caso armónico y unidimensional las cantidades de presión y velocidad son promedios o máximos.

Existen distintos tipos de ondas, entre las cuales se destacan las ondas P,

S, Rayleigh y Lamb, cada una con características particulares en cuanto a su modo de propagación:

- Las ondas P (primarias) son ondas de compresión, en las que las deformaciones ocurren en la misma dirección de propagación; por esta razón, se clasifican como ondas longitudinales.
- Las ondas S (secundarias) se caracterizan por presentar deformaciones perpendiculares a la dirección de propagación, por lo que corresponden a ondas transversales. Este tipo de ondas se produce por la acción de fuerzas cortantes, motivo por el cual los fluidos son prácticamente incapaces de transmitirlos.
- Las ondas de Rayleigh son un tipo de ondas de superficie que se propagan a lo largo de la periferia de un sólido, siguiendo su contorno.
- Las ondas de Lamb también pertenecen al grupo de ondas de superficie y se generan cuando el espesor del cuerpo es del orden de la longitud de onda (Gómez, 1980).

2.1.2.1. Relaciones y fórmulas de diversos parámetros para el caso de ondas planas

La frecuencia, longitud de onda y velocidad acústica presentan la relación de la ecuación 2.3 que es válida para todos los tipos de onda.

$$f \cdot \lambda = C \quad (2.3)$$

La impedancia acústica viene dada por la ecuación 2.4, siendo el producto de la densidad del medio por la velocidad de propagación.

$$Z = \rho \cdot C \quad (2.4)$$

La presión acústica y la amplitud máxima de oscilación están relacionadas por la ecuación 2.5, siendo ω la frecuencia angular. Las amplitudes de oscilación (A) en la aplicación de Ensayos No Destructivos son del orden de 2 millonésimas del valor de longitud de onda. (Gómez, 1980)

$$P = \rho \cdot C \cdot \omega \cdot A \quad (2.5)$$

La velocidad acústica se puede calcular a partir de la constante elástica del material (E) y de la relación de Poisson (μ). En las ecuaciones 2.6 y 2.7

se aprecia la fórmula para el cálculo de la velocidad de propagación longitudinal y transversal respectivamente en un medio sólido, infinito, elástico lineal, homogéneo e isótropo.

$$C_L = \sqrt{\frac{E \cdot (1 - \mu)}{\rho \cdot (1 + \mu) \cdot (1 - 2 \cdot \mu)}} \quad (2.6)$$

$$C_T = \sqrt{\frac{E}{\rho \cdot 2 \cdot (1 + \mu)}} \quad (2.7)$$

2.1.3. Comportamiento de las ondas ultrasónicas en superficies límites

2.1.3.1. Incidencia perpendicular o normal

Sean dos medios, el medio 1 y medio 2 cada uno con una impedancia acústica característica Z_1 y Z_2 , y una onda que se propaga por uno de ellos. Si una onda acústica incide perpendicularmente sobre la superficie plana y suave que separa los medios 1 y 2, parte de la energía de la onda se refleja y vuelve en la misma dirección de la incidente. La otra parte restante se transmite al medio siguiente manteniendo su dirección y sentido. Llamaremos R al coeficiente de reflexión y T al coeficiente de transmisión de intensidad acústica, siendo estos función de las impedancias acústicas de cada medio, en las ecuaciones 2.8 y 2.9 se aprecian los mismos.

$$R = \frac{(Z_2 - Z_1)^2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (2.8)$$

$$T = \frac{4 \cdot Z_1 \cdot Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (2.9)$$

Una primera conclusión que se deduce es que desde el punto de vista de las intensidades acústicas es indiferente de qué lado incide la onda ya que los valores de R y T no varían al permutarse las impedancias.

Con la presión acústica no ocurre lo mismo, ya que si la impedancia acústica del medio dos es mayor que la del medio uno, o sea $Z_2 > Z_1$, la onda reflejada estará en fase con la incidente. En el caso contrario $Z_1 > Z_2$ la onda reflejada sufrirá una inversión de fase. La onda transmitida siempre estará en fase con la incidente pero si $Z_2 > Z_1$ la amplitud de la onda transmitida será mayor

que la incidente, como se observa en la Figura 2.1 . En el caso contrario la onda transmitida presentará una disminución de la amplitud.

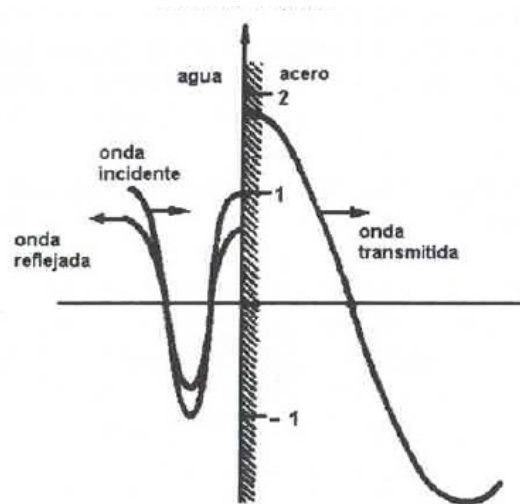


Figura 2.1: Reflexión y Transmisión de onda (León, 2009).

A continuación, en la Tablas 2.1 y 2.2 se presentan valores de referencia de impedancia acústica para diferentes medios y sus coeficientes de reflexión y transmisión al propagar una onda hacia la interfaz de combinaciones de ellos.

Tabla 2.1: Impedancia acústica.

Medio	Impedancia acústica $\times 10^6 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$
Agua	1.48
Aire	0.000398
Acero	45.7
Plexiglás	3.2

Tabla 2.2: Coeficientes de reflexión y transmisión.

Interfaz	R	T
Acero-Aire	0.999	3.48×10^{-5}
Acero-Agua	0.879	0.122
Plexiglás-Acero	0.755	0.245

2.1.3.2. Incidencia angular

Cuando una onda viaja por el medio 1 e incide en la superficie de contacto con el medio 2 con un ángulo de incidencia α_I se van a producir ondas reflejadas y transmitidas. Las transmitidas, también conocidas como refractadas cambian su dirección respecto a la de incidencia. Los ángulos de reflexión α_R y de transmisión α_T dependen del ángulo de incidencia y de las velocidades acústicas de los medios. Dicha relación se expresa según la ley de Snell en la ecuación 2.10 y en la Figura 2.2, siendo los subíndices 1 y 2 los medios que conforman la interfaz.

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{C_1}{C_2} \quad (2.10)$$

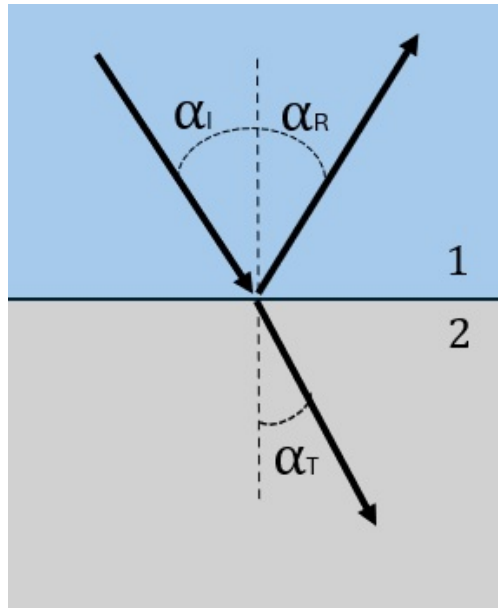


Figura 2.2: Incidencia angular.

En la incidencia oblicua aparece un nuevo fenómeno por el cual un tipo de onda puede transformarse en otro, es decir, ondas longitudinales a transversales o viceversa. Este fenómeno se conoce como desdoblamiento y por el mismo a partir de una sola onda incidente se originan cuatro nuevas cuando los dos medios son sólidos. En cada medio se originan ondas transversales y longitudinales reflejadas y transmitidas (Gómez, 1980).

2.1.4. Campo ultrasónico

Para esta descripción primaria se asume un oscilador en forma de disco que transmite a las partículas de material contiguo su movimiento vibratorio y que toda la superficie vibra con la misma amplitud y fase.

2.1.4.1. Campo próximo y campo lejano

Debido a la difracción y al fenómeno de borde, se produce en la proximidad del oscilador un campo con máximos y mínimos de presión acústica, efecto similar al generado por un diafragma según el principio de Huygens (León, 2009). La dimensión de dicho campo con interferencia lo determina la relación entre el diámetro del oscilador D y la longitud de onda. El último máximo de presión determina el final del campo de interferencia, el cual también se conoce como campo próximo. La longitud N del campo próximo se calcula mediante la ecuación 2.11 (Gómez, 1980)

$$N = \frac{D^2 - \lambda^2}{4 \cdot \lambda} \quad (2.11)$$

En casos prácticos donde la longitud de onda es de menor orden que el diámetro del oscilador, se puede despreciar el termino de λ^2 , quedando la ecuación 2.12.

$$N = \frac{D^2}{4 \cdot \lambda} \quad (2.12)$$

En el campo lejano la distribución de presiones son más homogéneas, lo que da lugar a la apertura del campo ultrasónico. Dicha apertura se caracteriza por medio del ángulo de divergencia γ_0 , el cual responde a la ecuación 2.13.

$$\sin \gamma_0 = 1.2 \cdot \frac{\lambda}{D} \quad (2.13)$$

Si $\frac{\lambda}{D}$ se aproxima a 1, teóricamente se obtendría un ángulo de 90° , es decir una emisión de forma esférica (Gómez, 1980).

La divergencia es el ángulo con el cual se abre o expande el haz ultrasónico, en el campo lejano es menor cuanto mayor sea el diámetro del transductor y su frecuencia. La variación de la anchura del haz es la que determina la resolución lateral. La resolución lateral indica la mínima distancia a la que pueden estar dos reflectores puntuales situados ambos en un mismo plano paralelo al transductor para que sean distinguibles. La resolución lateral está

determinada por el ancho del lóbulo principal o ancho del campo (Parrilla, 2004).

El patrón de radiación de un transductor se puede representar en diversas coordenadas. En la Figura 2.3 se observa el campo de un transductor de 20 milímetros de diámetro y una frecuencia de 1 MHz en coordenadas cartesianas. En la misma se observa un patrón que presenta simetría, un lóbulo principal donde se concentra la mayor parte de la energía acústica y lóbulos secundarios de menor intensidad que aparecen fuera del lóbulo principal. Los lóbulos secundarios no son deseados para aplicaciones de ensayos no destructivos.

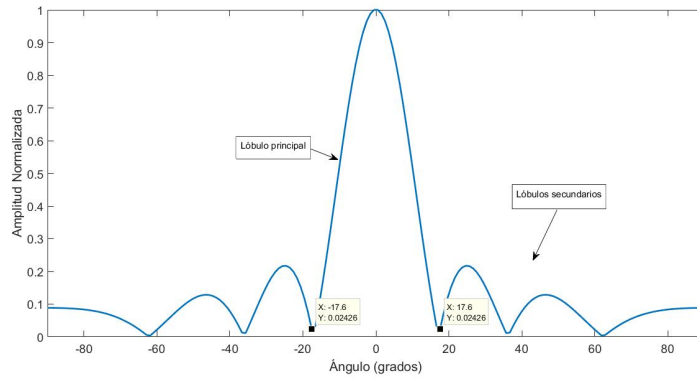


Figura 2.3: Patrón de radiación.

La presión acústica se puede calcular de forma simplificada según la ecuación 2.14, asumiendo una distancia a desde el oscilador donde $a \gg \frac{D^2}{4\lambda}$ y la ecuación 2.12 (Gómez, 1980).

$$P = P_0 \cdot \pi \cdot \frac{N}{a} \quad (2.14)$$

Resumiendo, las características del campo ultrasónico vienen dadas por la relación del diámetro del oscilador y la longitud de onda ($\frac{D}{\lambda}$), si este valor es grande se tendrá un haz definido y agudo con un campo próximo largo.

La presión acústica viene dada por la relación entre la superficie del oscilador y la longitud de onda, a suficiente distancia la presión acústica es inversamente proporcional a la distancia.

Como la longitud de onda depende de la velocidad de propagación en el material, un mismo oscilador producirá campos diferentes en materiales distintos. En los ensayos no destructivos el campo ultrasónico se puede simplificar al de la Figura 2.4, donde el campo próximo se considera como un cilindro de

longitud N cuya presión es nula en el exterior. Luego le sigue el campo lejano en forma de cono cuya presión acústica decrece desde el centro a la superficie.

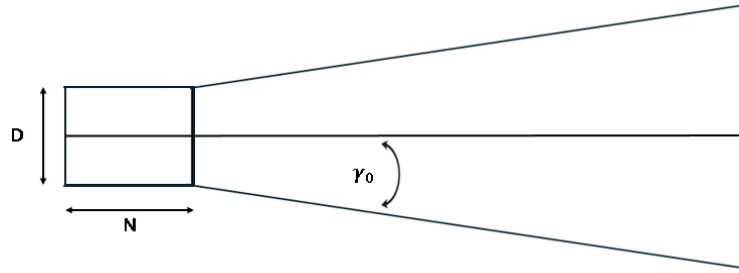


Figura 2.4: Campo ultrasónico.

La excitación de transductores por trenes de onda o por impulsos determina que en el campo ultrasónico no se generen máximos ni mínimos de interferencia total dado que las ondas tendrán un defasaje debido a la distancia recorrida. Los impulsos quedan mas distorsionados debido su superposición con defasaje y esto incide directamente en la amplitud producida por un reflector. Solo se tendrán pulsos no distorsionados en el campo lejano, por lo cual en la inspección de materiales se aconseja utilizar palpadores con un campo próximo pequeño o tener presente que dicha región no es óptima para la detección de reflectores (León, [2009](#)).

2.1.5. Atenuación de las ondas ultrasónicas

En materiales ideales la presión acústica se atenúa solo por la divergencia de la onda, pero en materiales reales existen otros fenómenos que generan un debilitamiento del ultrasonido los cuales son la dispersión y la absorción.

- Dispersión (*scattering*): se debe a que los materiales no son estrictamente homogéneos, contienen superficies límites y entrecaras pequeñas donde la impedancia acústica cambia bruscamente por consecuencia de cambios en la densidad o velocidad. Inclusiones, precipitados y diferentes fases en la estructura cristalina son heterogeneidades pequeñas que causan dispersión. Un material con un grano grueso en comparación con la longitud de onda ocasionará una gran dispersión de la onda ultrasónica. Se genera una reducción de la amplitud de lo ecos y muchos ecos parásitos denominados césped.

- Absorción: es la conversión directa de la energía ultrasónica en calor por el frenado de las partículas que están vibrando. La absorción disminuye la energía transmitida por lo cual la amplitud de eco también disminuye.
- La absorción y dispersión ambas aumentan con frecuencias mayores.

La variación de la presión por causa de la atenuación se puede representar por la ecuación 2.15, siendo P_0 la presión inicial, P la presión a una distancia a y α el coeficiente de atenuación (León, 2009).

$$P = P_0 \cdot \exp(-\alpha \cdot a) \quad (2.15)$$

2.1.6. Generación y recepción de ondas ultrasónicas

Diferentes fenómenos físicos pueden ser utilizados para la generación de ondas, los más utilizados para los END son la magnetostricción y la piezoelectricidad.

- Piezoelectricidad: si un material piezoeléctrico se comprime en la dirección de su eje eléctrico o mecánico por acción de una fuerza externa se generaran cargas eléctricas en su superficie, esto se denomina efecto piezoeléctrico directo y se utiliza para recepcionar ondas. El efecto piezoeléctrico inverso se utiliza para la emisión de ondas y consiste en colocar al cristal entre dos electrodos y aplicar una tensión alterna generando la vibración del mismo.
- Magnetostricción: se utiliza para la generación y recepción de ondas de baja frecuencia en el orden de 25 a 100 kHz. Este fenómeno se basa en el cambio de la forma de los materiales por la influencia de un campo magnético, entre estos materiales se encuentra el níquel.

Algunos de los materiales piezoeléctricos más utilizados para la generación de ultrasonidos son: titanato de circonato de plomo, titanato de bario, metaniobato de plomo, sulfato de litio y cuarzo.

De un cristal piezoeléctrico podemos destacar las siguientes características:

- Frecuencia característica fundamental: un cristal logra el mejor efecto cuando coinciden la frecuencia de excitación eléctrica con su frecuencia característica fundamental, dicha frecuencia se puede calcular según la ecuación 2.16, siendo d el espesor del oscilador y C la velocidad acústica

del mismo (Parrilla, 2004).

$$F_c = \frac{C}{2 \cdot d} \quad (2.16)$$

Para cristales de cuarzo de ondas longitudinales y transversales si el espesor del cristal es de 1 milímetro se obtienen frecuencias de 2,88 MHz y 1,92 MHz respectivamente.

- Temperatura crítica: temperatura a la cual el cristal pierde sus propiedades piezoeléctricas, también conocida como Punto de Curie. Para el cuarzo la misma es de 576°C.
- Módulo piezoeléctrico: representa cuánto cambia el espesor del oscilador por unidad de voltaje, cuanto menor sea este módulo implica que el material será peor emitiendo.
- Coeficiente de amortiguación interna: nos indica la mayor o menor capacidad que tiene el material para amortiguar impulsos, lo cual repercute en la sensibilidad de detección.
- Impedancia acústica: debe ser lo más baja posible para tener una buena amortiguación y un mejor acoplamiento.

En la Tabla 2.3 se presentan valores de referencia para diferentes materiales piezoeléctricos (León, 2009).

Tabla 2.3: Propiedades de materiales piezoeléctricos (León, 2009).

Material/ Propiedad	Titanato de Bario	Sulfato de litio	Cuarzo
Frecuencia característica para 1 mm (MHz)	2.2	2.36	2.88
Impedancia acústica (kg/m ² s)	27	11.2	15.2
Módulo piezoeléctrico (m/V)	125-190	15	2.3
Coeficiente de amortiguación interna	1	1.2	1

2.1.7. Transductores

Los transductores están conformados por un cristal oscilador de los cuales se detallaron sus características en la sección anterior, pero el resto de los elementos que conforma al transductor son de igual importancia ya que pueden

modificar las características de emisión y recepción. Hay una gran variedad de transductores pero de manera general los podemos clasificar en transductores de contacto o inmersión.

2.1.7.1. Transductores de contacto

Estos se utilizan directamente en la superficie de la muestra colocando un medio acoplante y ejerciendo un poco de presión. Según el ángulo de incidencia del haz los podemos clasificar como transductores de incidencia normal o angulares.

Los transductores de incidencia normal se utilizan para el estudio de defectología, medición y caracterización de materiales. En su gran mayoría producen ondas longitudinales, dentro de este tipo de transductores podemos tener con un único cristal que emite y recibe, con dos cristales uno emisor y otro receptor o de múltiples cristales. Un transductor de cristal único, emisor y receptor está constituido por el cristal piezoeléctrico, un cuerpo metálico, amortiguador del cristal, conductor eléctrico y conexión. En la Figura 2.5 se puede apreciar un esquema del mismo.

- Amortiguador del cristal: es un elemento fundamental de los equipos que funcionan con la técnica pulso-eco. Sus funciones son reducir el tiempo de oscilación del cristal, absorber ondas no deseadas y darle soporte mecánico al cristal. La primer finalidad del amortiguador es la más importante ya que influye directamente en el poder de resolución y en el tamaño de la “zona muerta” del campo sónico, región de la ventana temporal ocupada por la señal de emisión. Un transductor mal amortiguado presenta dificultad para detectar discontinuidades próxima a la superficie y para diferenciar discontinuidades cercanas entre sí. El amortiguador debe tener un fuerte poder de atenuación para poder absorber las ondas radiadas en el sentido opuesto al de la inspección.

Para poder transmitir la onda generada en el transductor hacia el medio de inspección es necesario utilizar un medio de acoplamiento. Es un medio acústicamente conductor que transmite las ondas desde el transductor a la pieza de ensayo, en caso de no colocarlo quedaría una película de aire entre el transductor y la superficie. Los medios acoplantes generalmente utilizados son grasas y aceites minerales con diversos grados de viscosidad, pastas de metilcelulosa y

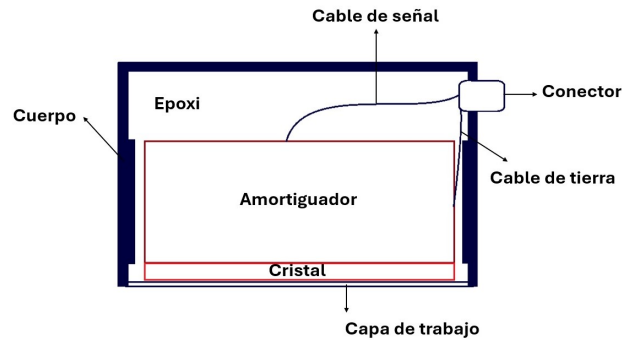


Figura 2.5: Componentes del transductor.

agua con agregados de glicerina. Para el caso de ondas transversales se deben emplear materiales altamente viscosos como lo son mezclas de aceite y cera o aceite y plasticina (Gómez, 1980).

2.2. Procesamiento de Señales

En esta sección se presentarán algunas funciones o métodos aplicables para el procesamiento de señales, los cuales son fundamentales para poder transformar una señal “cruda” en una señal analizable. Esto va a permitir poder extraer información de las mismas y lograr generar representaciones tipo imagen cuando se tenga un conjunto de señales.

2.2.1. Muestreo

Para obtener una secuencia de datos a partir de una señal en tiempo continuo y poder representarla de manera discreta, se puede utilizar el muestreo periódico de la señal. Donde se obtiene un conjunto de datos adquiridos cada un intervalo de tiempo constante denominado periodo de muestreo. A partir del periodo de muestreo se puede calcular la frecuencia de muestreo que representa la cantidad de datos tomados por segundo, dicha frecuencia debe cumplir con el criterio de Nyquist.

El criterio de Nyquist para adquisición de señales establece que la frecuencia de muestreo debe ser al menos el doble de la frecuencia máxima presente en la señal para asegurar una reconstrucción adecuada y no perder información

de la misma por tener una tasa de muestreo baja. La señal original puede ser reconstruida si se cumple la ecuación 2.17, donde f_N se le llama frecuencia de Nyquist y corresponde al doble de la frecuencia más alta contenida en la señal f_{max} (Blasina, 2019).

$$f_N \geq 2 \cdot f_{\max} \quad (2.17)$$

2.2.2. Interpolación y condensación de datos

La interpolación es un método para estimar valores entre puntos de datos conocidos o para crear datos intermedios que no se pudieron adquirir. Nos permite suavizar datos observados y completar datos faltantes. Hay diferentes funciones de interpolación, donde en cada una se consideran hipótesis distintas sobre cómo varían los datos a crear entre los datos reales.

La condensación de datos es lo opuesto ya que buscamos reducir la cantidad de datos para lograr procesamientos más rápidos. En este caso se van a promediar datos reales y van a ser sustituidos por dicho valor, reduciendo de esta manera la longitud de las señales. Indistintamente lo que se realiza por medio de software aumentando o disminuyendo el periodo en el cual se adquieren datos, es una variación de la frecuencia de muestreo que representa la cantidad de muestras tomadas por segundo en una señal (Veca y Accolti, 2016).

Matlab dispone de funciones como *downsample* y *upsample* para disminuir o aumentar los datos, e *interp* para la interpolación (MathWorks, 2024). En la Figura 2.6 se puede apreciar el resultado de generar una interpolación agregando 100 puntos de medida entre los datos originales.

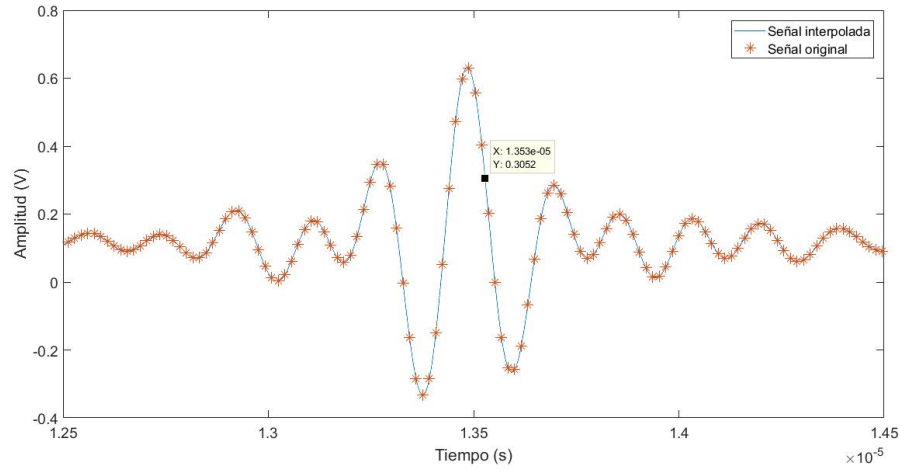


Figura 2.6: Comparación entre señal original e interpolada.

2.2.3. Promedio y valor medio

El valor medio y promedio de una señal son medidas importantes que se pueden utilizar en el análisis de señales ultrasónicas reduciendo el efecto del ruido aleatorio, esto puede mejorar la calidad de la señal y facilita la detección de indicaciones. También nos permite tomar un valor de referencia al normalizar una señal, lo cual permite encontrar cambios de amplitud.

El promediado es una herramienta que permite mejorar la relación señal a ruido, ya que parte del ruido se cancela debido a su aleatoriedad. El valor medio de una señal es aquel entorno al que oscila la misma. Para señales de transductores acústicos el valor medio corresponde al valor de corriente continua (DC), mientras que las oscilaciones de la señal corresponden a la corriente alterna (AC). La eliminación de la componente DC permite amplificar la amplitud de la señal evitando la saturación y haciendo visible componentes de la señales que estaban opacadas (Blasina, 2019).

2.2.4. Ventana temporal

Es importante tener una ventana temporal adecuada a nuestra medición ya que esto mejora la resolución temporal. Esta define la resolución con la cual se puede observar y analizar la señal en el dominio del tiempo, cuanto más estrecha es nuestra ventana mejor resolución temporal tenemos, lo cual permite discernir detalles finos en la estructura de los ecos y para calcular con precisión parámetros como la profundidad y la amplitud de los reflectores. También

nos asegura tener solamente los datos necesarios para el procesamiento lo cual genera una reducción del tiempo que lleva realizarlo. Aplicar ventanas de forma o tamaño incorrecta genera la pérdida de datos en la señal, los cuales pueden contener información relevante.

2.2.5. Detección de máximos o mínimos

Identificar los máximos y mínimos puede ayudar a caracterizar la amplitud de la señal ultrasónica en diferentes puntos de tiempo o posiciones espaciales. Esto nos permite entender la variabilidad y la forma de onda de la señal. También permite colocar ventanas de análisis a partir de la detección de ecos de gran amplitud en la señal generados por un reflector. Dentro de Matlab se tienen varias funciones para este propósito, como por ejemplo la función *max* (MathWorks, 2024).

2.2.6. Transformada Discreta de Fourier

La transformada de Fourier es una función que transforma una señal muestreada en el dominio del tiempo o del espacio en una señal muestreada en el dominio de la frecuencia, ya sea temporal o espacial. Nos permite detectar las componentes de frecuencia que conforman la señal, esto puede ayudar a detectar información relevante. La transformada de Fourier se define por la ecuación 2.18 para un vector x con n puntos muestreados uniformemente,

$$Y_{k+1} = \sum_{j=0}^{n-1} \omega^{jk} x_{j+1} \quad (2.18)$$

donde $\omega = e^{-\frac{2\pi i}{n}}$, es una de n raíces complejas donde i es la unidad imaginaria. Para x e Y , los índices j y k oscilan entre 0 y $n-1$. A continuación se puede observar en las Figuras 2.7 y 2.8 cómo a partir de una señal adquirida con un acelerómetro durante un ensayo de resonancia y al aplicarle la Transformada Rápida de Fourier se puede analizar su espectro de frecuencias respectivamente. Las funciones dentro de Matlab son *fft* para aplicar la transformada y la *ifft* para obtener su inversa (MathWorks, 2024).

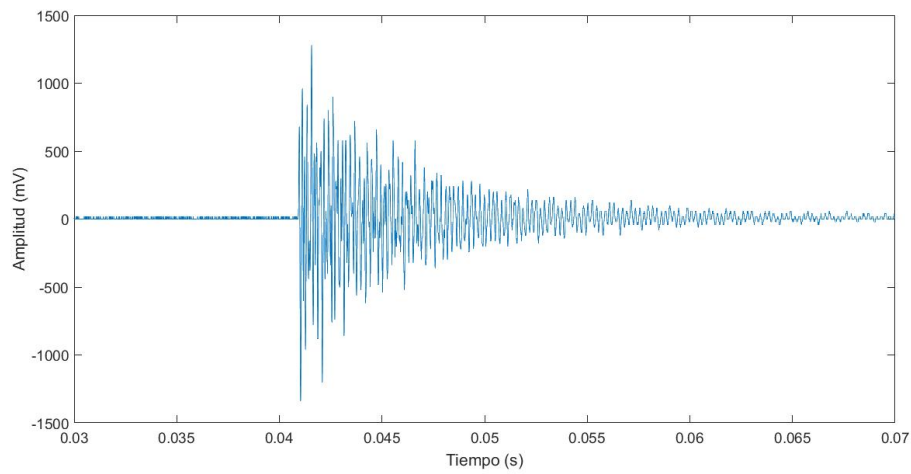


Figura 2.7: Señal captada por un acelerómetro.

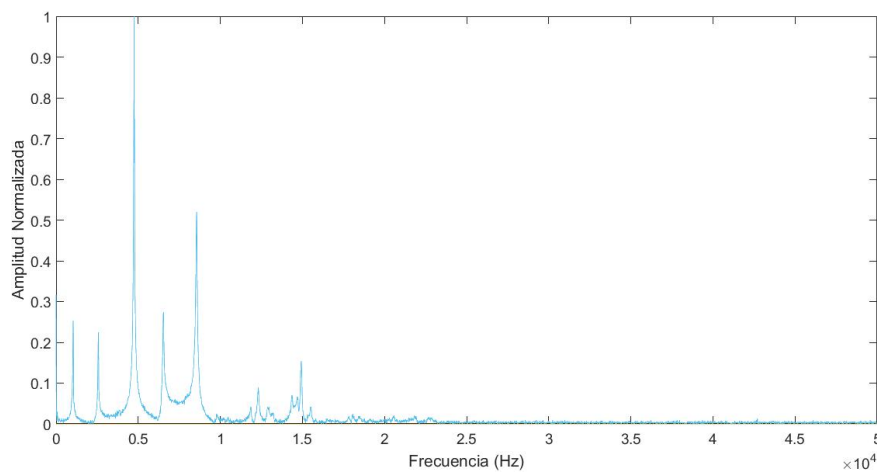


Figura 2.8: Análisis de frecuencias: se puede observar la frecuencia predominante de vibración en 0,5 Hz.

2.2.7. Filtros

Los filtros son herramientas fundamentales para seleccionar y procesar señales que se encuentran dentro de un rango específico de frecuencias, se puede decir que uno define las componentes que pasan por el filtro y cuales deben ser rechazadas. De manera general tenemos tres tipos de filtro: pasa-bajos, pasa-altos y pasa-banda, su principal diferencia radica en las componentes de la señal que deja pasar en relación a una frecuencia o rango de frecuencias. En este trabajo se utilizó el filtrado pasa-banda, el cual permite seleccionar un rango estrecho de frecuencias de interés desde una señal más amplia. Esto es útil

cuando se desea analizar o procesar solo las frecuencias que llevan información relevante para una aplicación específica (MathWorks, 2024)(Blasina, 2019).

En los gráficos de la Figura 2.9, se puede notar el efecto que genera el filtrado sobre la señal A- scan y que cuando el rango de frecuencias que se filtra no es el adecuado la señal empeora, ya que no estamos dejando pasar la información relevante. El gráfico superior es una señal obtenida a partir de un ensayo de ultrasonidos, en la cual se observa ruido. El gráfico intermedio es el resultado de aplicar un filtro pasa-banda a la señal anterior con un rango que concuerda con el transductor utilizado, y el ultimo gráfico resulta de aplicar el filtro anterior pero con una rango inadecuado lo cual genera un empeoramiento de la señal.

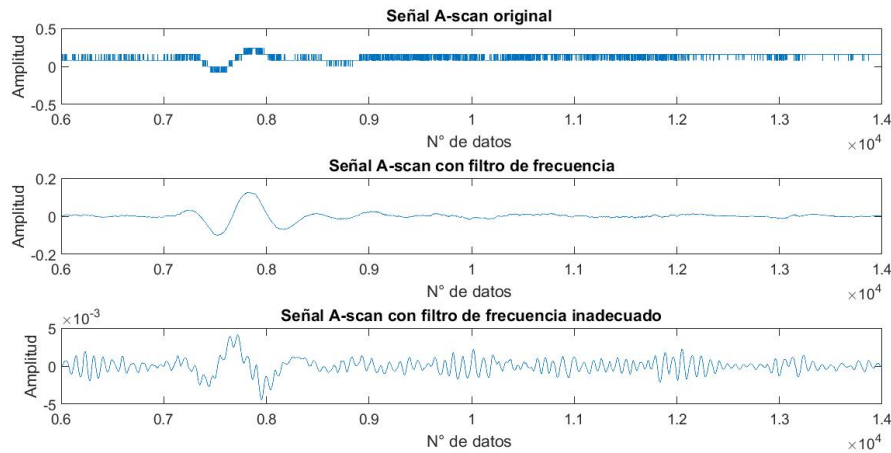


Figura 2.9: Filtrado de señales, a) señal original, b)señal filtrada adecuadamente, y c) señal filtrada de manera inadecuada.

2.2.8. Relación Señal-Ruido

La Relación Señal a Ruido (SNR), es una medida que indica la proporción entre la potencia de la señal ultrasónica deseada y la potencia del ruido que está presente en la señal. Esta relación es importante ya que determina la calidad de la señales ultrasónicas y por ende la de las imágenes ultrasónicas.

El ruido en las señales ultrasónicas se puede clasificar en ruido eléctrico y ruido de grano. El ruido eléctrico tiene su origen en la electrónica del instrumento y es consecuencia del propio circuito eléctrico.

Este ruido puede disminuirse con uso de filtros pasa-banda, los cuales dejan pasar sólo las componentes que quedan dentro de la banda de frecuencias del transductor.

El ruido de grano genera ecos no deseados, que son consecuencia de la microestructura interna del material y cuanto más heterogéneo es el material más grande es dicho efecto. Cada grano se comporta como un punto de dispersión (scattering), produciendo un eco que superpuesto con otros ecos conforma lo que se conoce como ruido retro dispersado (backscattering), llegando a enmascarar discontinuidades del material. En la ecuación 2.19 se observa su formula de cálculo, siendo la A_{eco} y A_{ruido} las amplitudes del eco de estudio y del ruido respectivamente (Quirós et al. 2017).

$$SNR = 20 \log \left(\frac{A_{eco}}{A_{ruido}} \right) \quad (2.19)$$

Para concluir la idea de SNR se simularon 2 señales A-scan y a una de ellas se le agregó ruido, esto se puede apreciar en la Figura 2.10.

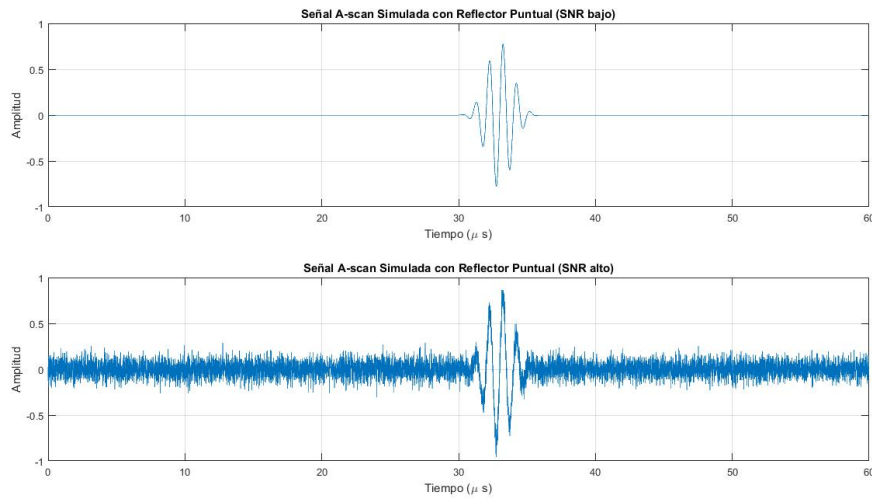


Figura 2.10: SNR, a) señal sin ruido, y b) señal con ruido agregado.

2.2.9. Correlación

La correlación entre señales es una medida de la similitud entre las mismas, se habla de auto correlación o correlación cruzada (cross correlation), cuando se buscan similitudes en la propia señal o entre señales diferentes respectivamente.

Las funciones de correlación son ampliamente usadas para la medición de retardos o diferencias temporales entre señales. En el campo del ultrasonido sirven para mediciones de distancia y tiempo, de velocidad y atenuación. En las Figuras 2.11 y 2.12 se puede apreciar el resultado de aplicar una correlación a una señal para obtener el defasaje temporal entre ambas (Veca y Accolti, 2016).

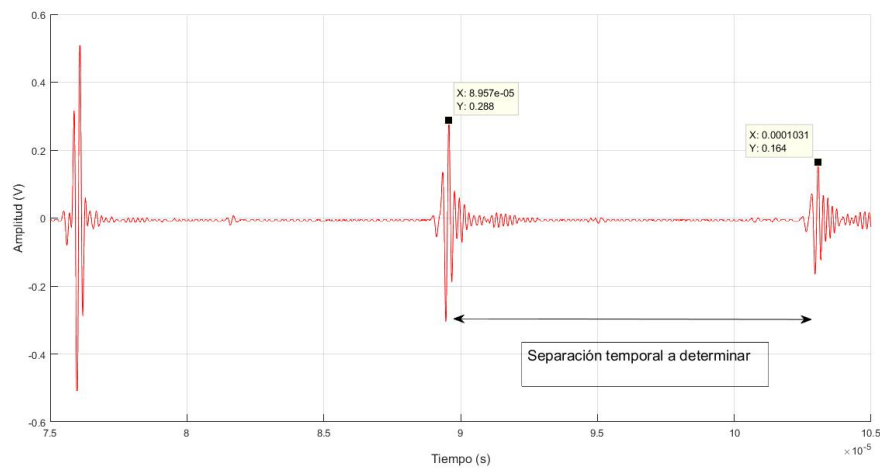


Figura 2.11: Señal Ultrasónica.

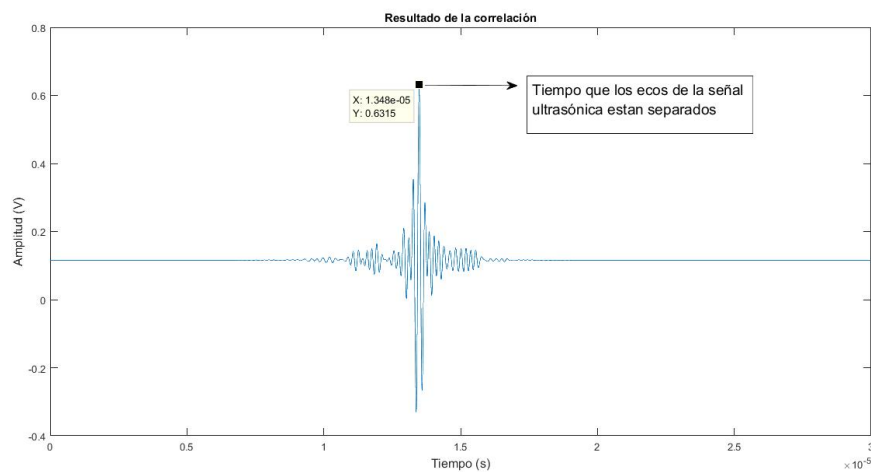


Figura 2.12: Resultado de la correlación.

2.2.10. Transformada de Hilbert y Envolvente

La envolvente de una señal es una curva que representa los límites externos de la amplitud de la señal original. Puede ser calculada utilizando la transformada de Hilbert o directamente a partir de los límites de de la amplitud de la señal. Esta función nos permite detectar cambios de amplitud en la señal ultrasónica generados por reflectores, también permite eliminar las oscilaciones rápidas de amplitud obteniendo una representación A-scan más estable y en algunos casos más fácil de interpretar. En la Figura 2.13 se puede ver el resultado de aplicar la función *envelope* de Matlab a una señal A-scan.

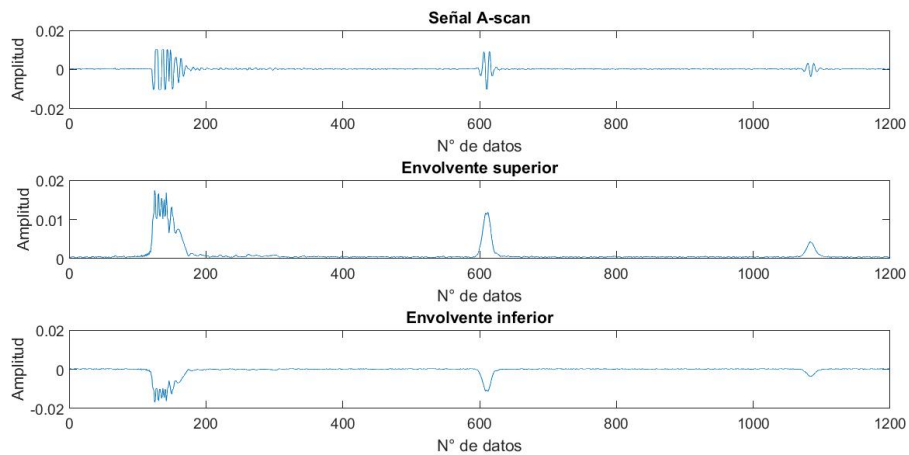


Figura 2.13: Envolturas de una señal, a) señal original, b) envolvente superior, y c) envolvente inferior.

2.2.11. Amplificación

La energía de las onda ultrasónicas se atenúa progresivamente a medida que viaja a través del medio, por lo tanto, las señales que regresan de los reflectores a una profundidad son más débiles en intensidad. Al amplificar selectivamente los ecos de mayores profundidades, utilizando una compensación de ganancia o amplitud, los reflectores iguales a profundidades desiguales se pueden mostrar como estructuras de igual intensidad en la representación (Karmakar y Kwok, 2009).

2.2.12. Apodización

El término apodización se relaciona con el “podado” o limitación de los efectos debidos a los elementos más alejados del centro del *array*. Se utiliza para mejorar la forma del haz y reduce los lóbulos laterales a costa de ensanchar ligeramente el lóbulo principal. Existe una gran cantidad de funciones de apodización propuestas en la literatura como la Gausiana, Coseno, Bartlett, Hamming, Hanning y Blackman. En la Figura 2.14 se observa el resultado de aplicar una ventana de apodización Hamming a un patrón de radiación de un transductor ultrasónico, se puede apreciar el efectos de atenuación en los lóbulos secundarios (Parrilla, 2004).

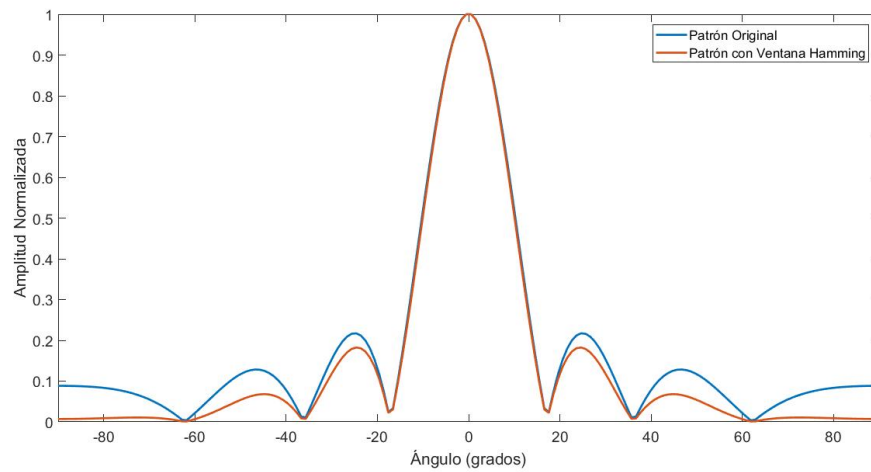


Figura 2.14: Apodización Hamming.

2.3. Imágenes Ultrasónicas

Dentro del campo de generación de imágenes ultrasónicas existen las técnicas que utilizan arreglos de fases, las cuales se basan en transductores con múltiples elementos los cuales pueden emitir y recibir en diferentes momentos generando diferentes características en el campo sónico. Los arreglos ofrecen un gran potencial para aumentar la calidad de la inspección y reducir el tiempo de inspección, pueden producir imágenes inmediatas de la estructura de prueba.

Los transductores utilizados en arreglos de fases, también denominados matrices ultrasónicas ofrecen ventajas claves sobre los transductores estándar. En primer lugar, pueden realizar una variedad de inspecciones diferentes desde una sola ubicación y, por lo tanto, son más flexibles que un transductor de un solo elemento. De hecho, una matriz puede generar campos ultrasónicos de una variedad casi infinita. Sin embargo, se utilizan más comúnmente para producir campos similares a los de los transductores tradicionales de un solo elemento, es decir, haces planos, enfocados y dirigidos. Luego, la multiplexación permite que los canales de transmisión-recepción disponibles se cambien para excitar y recibir usando un subconjunto (denominado apertura) de los elementos en una matriz más grande. Los transductores de matriz ultrasónica se pueden clasificar según su geometría en unidimensionales (1-D), bidimensionales (2-D) o anulares. Los arreglos lineales 1-D son los más extendidos en la industria, estos consisten en una fila de elementos en forma de tira (Drinkwater y Wilcox, 2006).

Dentro del marco de esta tesis no se profundizará el estudio de ultrasonidos por medio de arreglo de fases o ultrasonidos multicanal.

2.3.1. Representaciones convencionales

A mediados del siglo 20, se inició el desarrollo de equipos ultrasónicos, abarcando tanto detectores de fallas como sistemas de inspección automática basados en ultrasonidos. En este entorno, las áreas más sobresalientes de investigación y aplicación en el campo de los ultrasonidos abarcan la mejora continua de detectores de fallas ultrasónicos de naturaleza digital, el desarrollo de dispositivos con capacidad multicanal, la implementación de técnicas de generación de imágenes mediante ultrasonidos y la adopción de la técnica de difracción de tiempo de vuelo (TOFD), además de las pruebas ultrasónicas con ondas

guiadas.

Específicamente, las imágenes ultrasónicas y la técnica TOFD han demostrado tener aplicaciones sumamente relevantes en la evaluación de cilindros de gran tamaño sin costura y en la inspección de soldaduras en tuberías. Estos enfoques han causado un impacto significativo en el ámbito de la inspección, ya que permiten identificar con precisión y eficiencia posibles imperfecciones y defectos (Shen, [2006](#)).

2.3.1.1. Representación A-SCAN

El A-scan (escaneo de amplitud) es una técnica en la que se gráfica la amplitud de los ecos en función del tiempo. En otras palabras muestra la cantidad de energía ultrasónica recibida en función del tiempo. La energía recibida se traza en el eje vertical y el tiempo transcurrido se representa en el eje horizontal. La mayoría de los equipos de A-scan permiten visualizar la señal en su forma natural de onda, ya sea como una señal rectificada o como la mitad positiva o negativa de la señal. Con el A-scan, se puede estimar un tamaño relativo de una discontinuidad comparándolo con un reflector conocido. La profundidad de la reflexión se puede determinar por la posición de la señal en el eje temporal. En la Figura [2.15](#) se muestra una representación A-scan como las nombradas anteriormente (Merino, [2009](#)).

En general, los datos generados en las pruebas ultrasónicas se presentan al inspector en forma de señales A-scan. Estas representaciones pueden resultar bastante complejas y difíciles de interpretar sin una formación extensa por parte del operario (Doctor et al. [1986](#)).

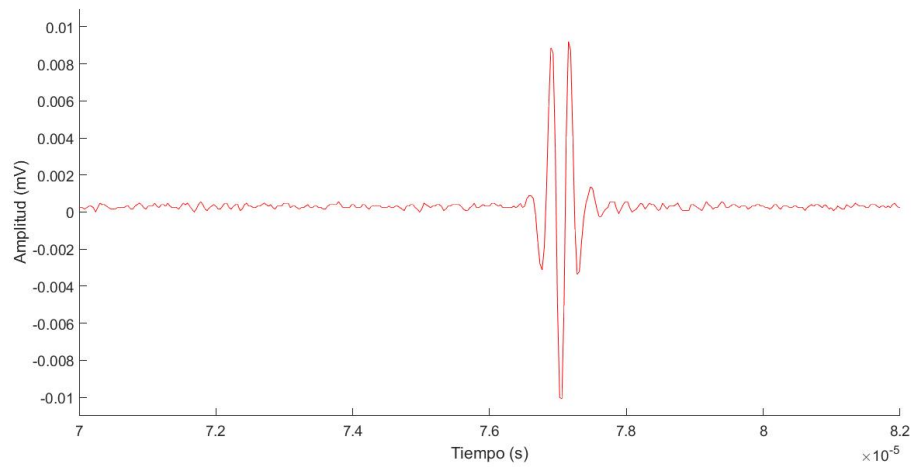


Figura 2.15: A-scan.

2.3.1.2. Representación B-SCAN

Según (Kroworz y Katunin, 2018), el B-scan es una representación más avanzada, que muestra la profundidad de los reflectores con respecto a la superficie de inspección.

El B-scan se forma por la agrupación ordenada de diferentes A-scan, siendo cada uno de ellos representativo de una ubicación definida en la superficie de inspección. En la Figura 2.16 se puede observar la representación de un B-scan conformado por un conjunto de 5 señales A-scan, las cuales fueron adquiridas en las posiciones marcadas y todas tienen información del reflector analizado.

Las representaciones B-scan proporcionan una vista de la sección transversal de la muestra de prueba. En el B-scan, el tiempo que toma la energía acústica en viajar se muestra en el eje vertical, mientras que la posición lineal del transductor se representa en el eje horizontal. Utilizando el B-scan, es posible determinar tanto la profundidad de la reflexión como una aproximación de las dimensiones lineales en la dirección del escaneo.

La representación más básica de B-scan se genera configurando un umbral en la señal del A-scan, si la intensidad de la señal es suficiente para superar el umbral, se registra un punto en el B-scan (Merino, 2009).

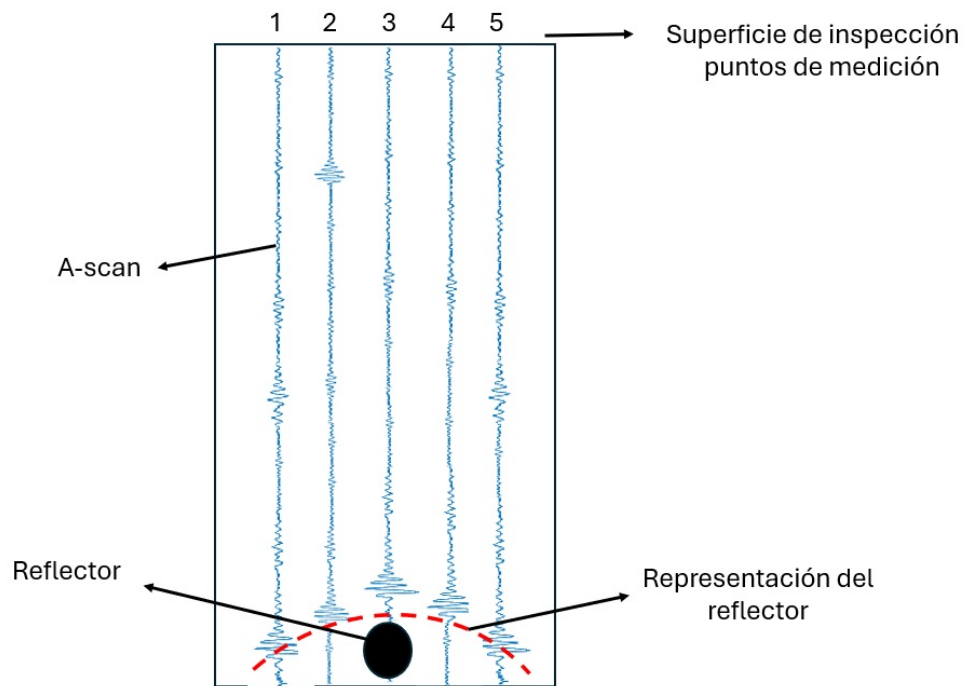


Figura 2.16: Generación de B-scan.

2.3.1.3. Representación C-SCAN

Además, existe el C-scan, en el que el transductor se mueve en coordenadas planas. El C-scan representa datos en dos dimensiones, ofreciendo una vista en planta superior de la pieza de prueba. En esta representación, los colores indican la amplitud de la señal o la profundidad de cada punto en la pieza de prueba (Kroworz y Katunin, 2018).

La representación C-scan ofrece una vista que muestra la ubicación y el tamaño del defecto en la muestra que está siendo inspeccionada. La imagen está en un plano paralelo a la dirección en la que el transductor realiza el escaneo. Normalmente, se establece una ventana de recolección de datos entre la amplitud del A-scan y el tiempo que lleva que la señal registrada viaje en intervalos regulares. La representación C-scan proporciona una imagen de las características que reflejan y dispersan las ondas dentro de la muestra y en sus superficies. En la Figura 2.17 se puede observar el resultado de inspeccionar un material compuesto y generar su representación C-scan (Merino, 2009).

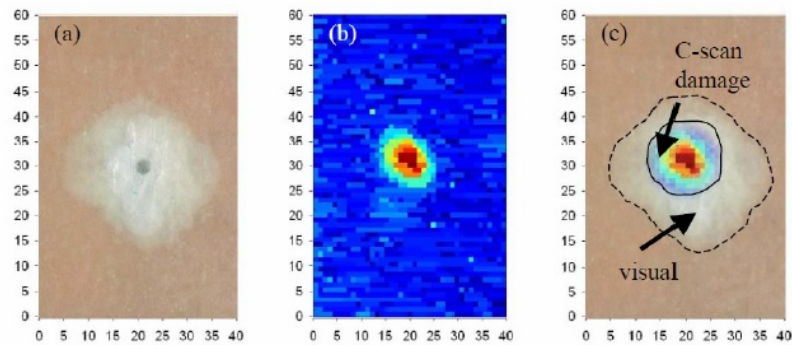


Figura 2.17: Inspección material compuesto, a) imagen digital, b) representación C-scan c) superposición de C-scan e imagen digital (Merino, 2009).

2.3.1.4. Representación TOFD

La técnica de difracción de tiempo de vuelo (TOFD) también se ha aplicado con éxito para la evaluación cuantitativa del tamaño de las grietas en diversas industrias. El enfoque de este método radica en el aprovechamiento de la difracción de los campos de ondas generados por transductores en los bordes y/o extremos de los defectos, en lugar de depender de señales reflejadas. Estas señales difractadas, aunque relativamente tenues, pueden ser detectadas a lo largo de un amplio rango angular. Para llevar a cabo la experimentación, se sitúan un transductor de emisión y otro de recepción a una distancia fija en una configuración en forma de V como se observa en la Figura 2.18. Esto se hace generalmente con ondas longitudinales con ángulos de incidencia de 45° , 60° o 70° .

En el contexto de la inspección de soldaduras, las sondas se ubican a ambos lados de la junta soldada y se escanean en paralelo o perpendicularmente a la misma. La información sobre la presencia de un defecto y su tamaño puede extraerse a partir de los datos extraídos de la señal obtenida.

Tal como se representa en la Figura 2.18, la primera señal captada por el transductor receptor generalmente se refiere a la onda progresiva o lateral, que se propaga a lo largo de la región cercana a la superficie del componente inspeccionado. En ausencia de reflectores o defectos, la segunda señal que llega al receptor es el eco proveniente de la pared trasera, resultado de la reflexión de la onda longitudinal incidente en dicha pared.

Si existe un defecto, como uno orientado verticalmente, la onda longitudinal

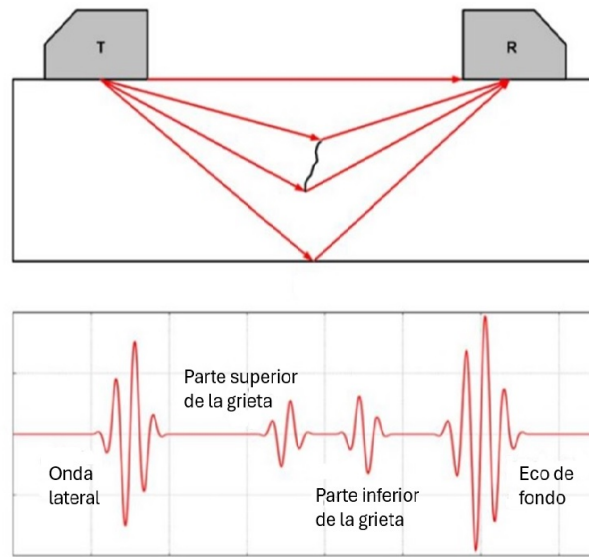


Figura 2.18: Técnica TOFD (Spies et al. 2012).

se difracta en los bordes o extremos superior e inferior, generando ondas de amplitud relativamente baja que son detectadas por el transductor receptor. Al medir los tiempos de vuelo de los ecos difractados desde la parte superior e inferior de la grieta, es posible obtener información sobre la profundidad del defecto y su tamaño (Spies et al. 2012).

2.3.2. Técnica de Enfoque de Apertura Sintética (SAFT)

2.3.2.1. Antecedentes SAFT

El objetivo de las pruebas no destructivas en la industria es detectar fallos o defectos en los componentes estructurales y clasificarlos según su tamaño, forma, orientación, ubicación y composición. El SAFT mejora las pruebas ultrasónicas convencionales al proporcionar imágenes más detalladas de los defectos. Es una técnica flexible y puede adaptarse a diferentes materiales, geometrías y modos de propagación ultrasónica. Mejora la relación señal-ruido, facilitando la detección de defectos pequeños (Busse y Collins, 1984).

El SAFT se basa en técnicas de Radar de Apertura Sintética (SAR) y Sonar de Apertura Sintética (SAS), que han sido ampliamente utilizadas durante muchos años para mejorar la resolución en imágenes de radar y sonar. Las primeras aplicaciones SAFT en la evaluación no destructiva de materiales fue en

la décadas de 1970 y 1980. Se implementó en el dominio del tiempo con técnicas de retardo y suma, siendo principalmente utilizada para la detección de defectos en estructuras metálicas gruesas, especialmente en plantas de energía nuclear y en recipientes a presión. El SAFT surgió como una técnica de procesamiento digital de señales ultrasónicas, basada en la retropropagación de datos A-scan para reconstrucción de imágenes. Su desarrollo estuvo influenciado por las técnicas de tomografía computarizada por rayos X (Stepinski, 2007b) (Schickert et al. 2003) (Almeida, 2022).

Las aplicaciones Industriales de SAFT son:

- Inspección de soldaduras en tuberías y estructuras metálicas para detectar grietas, porosidad y discontinuidades asegurando la calidad de las uniones. Este método es ampliamente utilizado en sectores como petróleo, gas y construcción, donde la integridad estructural es crucial.
- Evaluación de componentes aeronáuticos como materiales compuestos y metales en aeronaves y turbinas, permitiendo detectar defectos internos sin necesidad de desmontar las piezas. Esta técnica es clave para el mantenimiento preventivo en la industria aeroespacial.
- Monitoreo de corrosión en infraestructuras industriales, por ejemplo, la inspección de estructuras metálicas sometidas a ambientes corrosivos, como plantas industriales y plataformas marítimas (Almeida, 2022).

El SAFT tuvo una expansión a la industria del hormigón, en los años 1990 varias investigaciones aplicaron SAFT en la evaluación de estructuras de hormigón, específicamente en la detección de ductos para tensores y defectos internos. El SAFT ha sido utilizado para inspeccionar puentes, túneles y edificaciones de hormigón, mejorando la detección de fisuras, ductos y refuerzos internos. En la inspección en puentes se ha aplicado con éxito en la detección de fallas en la inyección de mortero dentro de los ductos. También se ha logrado la medición y evaluación del espesor de losas y muros en estructuras de gran tamaño (Schickert et al. 2003).

2.3.2.2. SAFT

El procesamiento SAFT simula un transductor enfocado, los cuales están diseñados para concentrar y dirigir ondas acústicas en una dirección específica, mejorando la resolución y precisión. Uno de los beneficios notables de SAFT

es su capacidad para corregir imperfecciones de la imagen causados por refracción cuando se inspeccionan objetos de formas y tamaños irregulares. Corregir esta problemática con un enfoque físico requeriría diseñar transductores con propiedades focales variables para cada parte y zona de la pieza inspeccionada. El proceso típico de adquisición de datos con SAFT involucra colocar un transductor en la superficie del objeto a escanear. Este transductor simula una fuente/receptor puntual, lanzando un haz ultrasónico divergente hacia el objeto. A medida que el transductor se desplaza sobre la superficie, se registran series de A-scan para cada posición. Cada reflector dentro del objeto produce una colección de ecos en los A-scan, que generan una curva hiperbólica característica cuando se combinan (Doctor et al. [1986](#)).

Al aplicar SAFT, los A-scans obtenidos durante un experimento de pulso-eco, son analizados considerando las coordenadas del transductor, las velocidades ultrasónicas y los tiempos de vuelo. Se fragmenta el volumen de inspección en pequeños píxeles y las señales captadas en las posiciones correspondientes del transductor se agregan en dichos píxeles. El enfoque SAFT se basa principalmente en las coordenadas de la sonda, las velocidades ultrasónicas y la información sobre el tiempo de vuelo y la amplitud de la señal. La manipulación algorítmica de los datos conduce a una mejora en la imagen debido a la interferencia constructiva en las señales generadas por los reflectores, además de una reducción de ruido en las señales gracias a la interferencia destructiva (Spies et al. [2012](#)).

Las ondas ultrasónicas son reflejadas o dispersadas por objetos que tienen una impedancia acústica más alta o más baja que el medio circundante. Si se realizan múltiples mediciones ultrasónicas en varias posiciones diferentes, el conjunto de datos resultante se puede mostrar como una imagen de reflectividad acústica. El concepto de apertura sintética se basa en realizar mediciones de una región de interés (ROI), en varias posiciones diferentes, y combinar las mediciones en el pos-procesamiento para sintetizar una gran enfoque sintético. En un conjunto de datos sin procesar, la resolución lateral disminuye a medida que aumenta la distancia al sensor, debido a la divergencia del haz. El procesamiento de apertura sintética produce un haz mucho más estrecho y, por lo tanto, una resolución lateral más alta, lo que da lugar al término enfoque de apertura sintética. El enfoque de apertura sintética es esencialmente una correlación de los datos registrados con la respuesta esperada de cada punto de la imagen (Dias et al. [2011](#)).

Para el procesamiento de las señales ultrasónicas recibidas, el algoritmo SAFT divide el objeto en pequeños elementos de imagen. Para cada elemento se calcula el tiempo de vuelo de ida y vuelta de la onda. Se le asigna la señal recibida correspondiente en el tiempo calculado en términos de amplitud y fase. Para la imagen final, el algoritmo SAFT superpone los resultados de todas las configuraciones, sintetizando así un transductor ultrasónico de apertura total con la capacidad de enfoque variable para cada elemento de la imagen (Müller et al. 2010).

El ruido en las imágenes ultrasónicas puede ser eléctrico o surgir de la presencia de diminutos dispersores, los cuales provocan fluctuaciones en la amplitud del eco. El ruido reduce la capacidad de detección de los sistemas de imágenes ultrasónicas y afecta indirectamente la identificación de reflectores específicos en las regiones de interés.

Las imágenes de composición espacial, se producen al ver la ROI desde varias ubicaciones y orientaciones con un transductor. La composición espacial reduce el ruido y aumenta el contraste de la imagen al promediar diferentes señales de la misma ROI. Primero se calcula la envolvente de los A-scan para luego obtener un B-scan. Las imágenes compuestas se generan promediando de diferentes formas las imágenes B-scan, por ejemplo con la media, mediana, raíz cuadrada o media geométrica. En medicina el promedio coherente de las imágenes médicas es generalmente difícil por los movimientos de los tejidos y a la posición inexacta del transductor. En los END es diferente, ya que el objeto de prueba es estacionario y la posición del transductor se puede medir con mucha precisión (Stepinski, 2007a).

2.3.2.3. SAFT en el dominio del tiempo

En SAFT, las mediciones de pulso-eco realizadas en varias ubicaciones se combinan para formar un mapa de la reflectividad ultrasónica de la región de interés. El método aprovecha las correlaciones espaciales y temporales para mejorar la resolución y la relación señal/ruido de las imágenes resultantes. El dominio del tiempo SAFT (td SAFT) se ha utilizado en END ultrasónicos principalmente porque es capaz de mejorar la resolución lateral en la zona focal y extiende la zona focal dando como resultado un efecto de enfoque dinámico. Por lo general, las implementaciones de END SAFT se realizan utilizando un procesamiento de retraso y suma (DAS) en el dominio del tiempo. DAS es una

forma sencilla de simular el efecto de enfocado deseado, comúnmente utilizado en arreglos en fase (Stepinski, 2007a).

2.3.2.4. SAFT en modo de contacto

Para el caso donde un solo transductor de apertura finita no enfocado se mueve a lo largo del eje horizontal. La región de interés contiene una serie de objetivos reflectantes (fallas) en el dominio espacial (x, y), donde x se denomina rango mientras que y identifica el rango cruzado. El elemento transductor se mueve a lo largo del eje u , que es paralelo al eje y del objetivo, y transmite un pulso de banda ancha. En la Figura 2.19 se aprecia la representación de esta situación con el agregado del lóbulo principal del haz y el cálculo del radio desde la posición de escaneo al reflector.

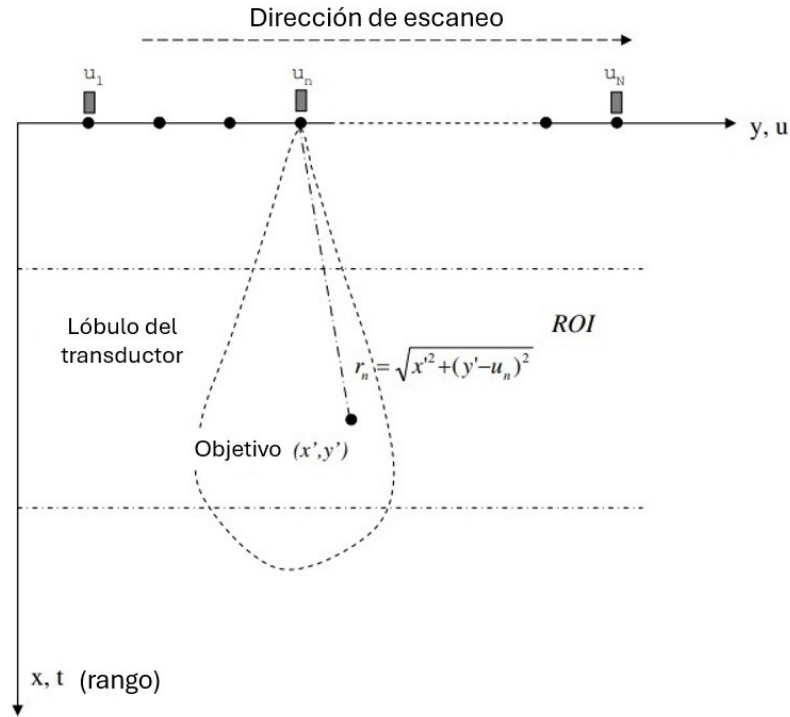


Figura 2.19: SAFT modo contacto (Stepinski, 2007a).

Al unir las señales A-scan las reflectividades generadas por un reflector puntual forman una hipérbola, esto se explica con la Figura 2.20, si el transductor en la posición A recibe un eco del objetivo O , se interpretaría como la indicación de O' ubicada debajo de A en la profundidad AO (Stepinski, 2007a).

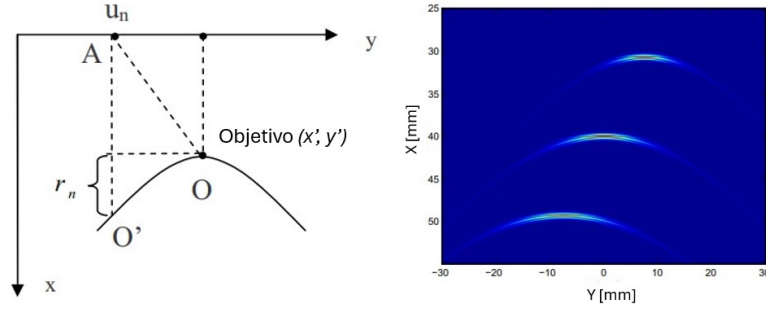


Figura 2.20: Hipérbolas en imágenes (Stepinski, 2007a).

2.3.2.5. Resolución

Se refiere a la capacidad de distinguir y representar de manera precisa detalles finos o estructuras pequeñas en la imagen reconstruida. La resolución espacial está relacionada con la separación mínima entre dos puntos o estructuras que pueden ser resueltas como objetos separados en la imagen. Una mayor resolución espacial implica una capacidad mejorada para representar detalles más pequeños y distinguir estructuras más cercanas entre sí. Específicamente, se refiere a la capacidad de mostrar con precisión la ubicación y la profundidad de las estructuras en la imagen, y separarlas correctamente.

La resolución en SAFT puede verse influenciada por varios factores, como la calidad y la cantidad de las señales de ultrasonido A-scan adquiridas, la geometría del sistema de adquisición, la frecuencia central de operación, la resolución temporal y la técnica de reconstrucción utilizada.

Cuando se habla de resolución axial se hace referencia a la capacidad de separar la presencia de varios reflectores próximos en el sentido de la propagación del haz. En la Figura 2.21 se observa un ejemplo donde se inspecciona una probeta con 3 reflectores, de los cuales los últimos 2 están muy próximos entre sí. En el primer caso no se logra diferenciar los últimos 2 orificios pero luego al utilizar un transductor de con mayor resolución axial se logran diferenciar.

La resolución lateral hace referencia a poder diferenciar 2 reflectores próxi-

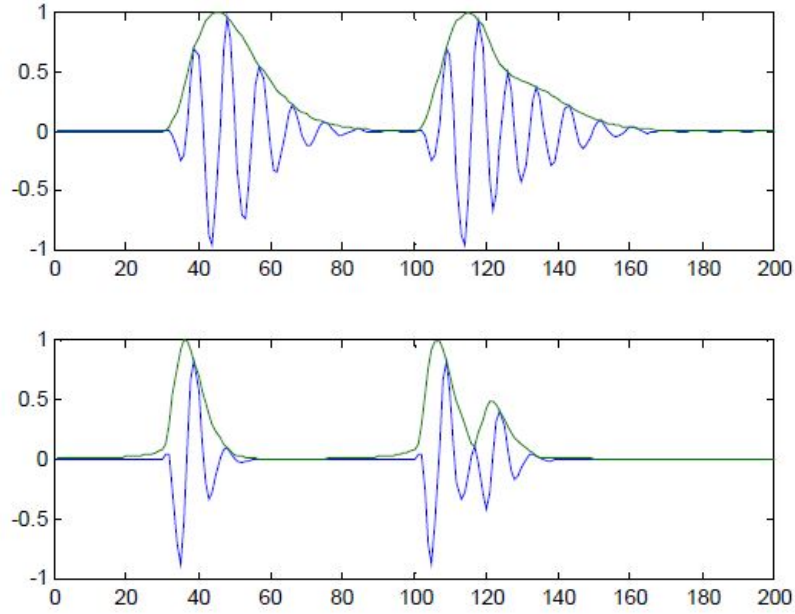


Figura 2.21: Resolución Axial (Parrilla, 2004).

mos entre sí pero en el sentido perpendicular al eje del haz ultrasónico. La focalización del haz mejora la resolución lateral, esta puede ser generada por un lente físico o por medio del procesamiento. En el caso de un foco fijo se establece un único retardo para una distancia concreta. Un punto habitual para colocar el foco es la mitad de la región que se va a inspeccionar. Alrededor del foco la resolución lateral es máxima disminuyendo a medida que nos alejamos de él (Parrilla, 2004).

2.3.2.6. Longitud de apertura efectiva

Para determinar el número de A-scan que deben incluirse en la apertura sintética, se define el concepto de longitud de apertura efectiva (L_{ef}). Los transductores tienen un patrón de haz que adopta la forma de un lóbulo principal con varios lóbulos laterales. El ancho del lóbulo principal es un parámetro importante que define la resolución del rango cruzado del transductor.

El parámetro L_{ef} se define como la mayor apertura del SAFT que contribuye al rendimiento de la resolución lateral. Se supone que las señales recibidas por todos los elementos de una apertura sintética se usan eficientemente si el L_{ef} no es más largo que el ancho del lóbulo del transductor utilizado. Para un transductor circular con diámetro d , el ancho del lóbulo a media potencia y a

una distancia R se calcula según la ecuación 2.20 (Stepinski, 2007a).

$$L_{ef} = \frac{R\lambda}{d} \quad (2.20)$$

Por lo tanto, para un determinado transductor (para d y longitud de onda fijos), cuanto mayor sea el rango R , mayor será el L_{ef} . Por otro lado, para un rango fijo, un diámetro de transductor más pequeño o una frecuencia central de transductor más baja también da como resultado un L_{ef} más largo. Vinculando el L_{ef} , la resolución lateral y aplicando el principio de muestreo de Nyquist, el paso de muestreo espacial (δ_u) a lo largo del eje y en SAFT debe cumplir con la siguiente ecuación (Stepinski, 2007a).

$$\delta_u \leq \frac{d}{4} \quad (2.21)$$

2.3.3. Calidad de imágenes

Para analizar las mejoras luego del procesamiento de imágenes comúnmente se realiza la evaluación de la relación contraste a ruido (CNR) y la relación señal a ruido (SNR), el aumento de dichos valores conlleva a un mejoramiento de las imágenes procesadas.

Las medidas de SNR para generación de imágenes ultrasónicas pueden ser de dos formas, la primera es aplicada a una señal A-scan individual como se explicó anteriormente. La otra forma se basa en evaluar el SNR directamente en la imagen, midiendo en una región donde se encuentra la señal que nos interesa el valor promedio de los pixeles en contraposición con el valor promedio de los pixeles en la región del ruido.

El CNR es calculado cuando se trabaja en la evaluación de quistes en el ámbito médico o de cavidades en el ámbito industrial. Con esta medición comprobamos si el sistema es capaz de separar dos zonas por medio de contraste para identificar cavidades. En la ecuación 2.22 se presenta la formula del cálculo correspondiente,

$$CNR = \frac{\mu_c - \mu_b}{\sigma_b} \quad (2.22)$$

donde μ_c es la intensidad promedio del quiste o cavidad, μ_b es el promedio del fondo y σ_b es la desviación estándar del fondo (Padín, 2007) (Gonzalez et al. 2016).

Capítulo 3

Metodología Experimental y Procesamiento

En este capítulo se explicarán las distintas actividades experimentales realizadas y su secuencia con el fin de poner en práctica los conceptos anteriormente estudiados para lograr inspeccionar diferentes elementos por medio de la generación de imágenes ultrasónicas.

3.1. Montaje Experimental

Para lograr realizar las experiencias fue necesario contar con los siguientes elementos:

- Equipo de Ultrasonidos Industrial, Marca: SIUI y Modelo: CTS-59.
- Transductor de haz recto mono cristal, Marca: SIUI y Modelo: TG1-20NL.
- Osciloscopio, Marca: SIGLENT y Modelo: SDS1104X-E.
- PC y Software Matlab.
- Cables de conexión LEMO-00, BNC-LEMO-00 y derivaciones “T”.
- Acoplante e instrumentos de metrología.
- Cuerpos de estudio con reflectores internos artificiales y naturales.

En las siguientes Figuras [3.1](#) y [3.2](#) se aprecia como es el montaje experimental.

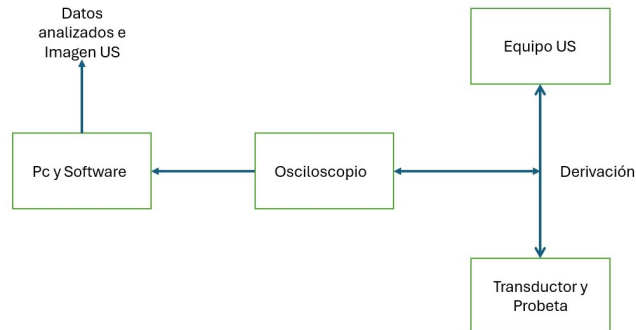


Figura 3.1: Esquema Experimental.



Figura 3.2: Montaje Experimental.

El equipo de ultrasonidos es un equipo comercial de uso industrial el cual se utiliza principalmente para la medición de espesores, pero también cuenta en una forma muy básica con la representación de la señal A-scan y la posibilidad de generar un histograma de mediciones de espesor. Este equipo se utilizó como generador de señales al cual estaba conectado el transductor, elemento con el cual se realiza la inspección sobre la probeta de estudio. Al cable que conecta el equipo de ultrasonido con el transductor se le colocó una derivación “T”, la cual es conectada en el osciloscopio. Esta derivación permite que el osciloscopio capte la señal eléctrica que genera el equipo de ultrasonidos para excitar al transductor y luego la respuesta del mismo cuando la onda ultrasónica ya recorrió el cuerpo de estudio. Es importante comprender que la señal A-scan que se obtiene de esta manera es la “pura” respuesta eléctrica del pulsador y del transductor sin ningún tipo de procesamiento al no ser los realizados

por el osciloscopio en la propia adquisición. Luego las señales adquiridas por el osciloscopio fueron procesadas y analizadas para generar los resultados del ensayo.

Se utilizaron diversos cuerpos de prueba a medida que el trabajo de estudio progresaba, dentro de esta tesis se hace referencia a tres cuerpos los cuales son descritos a continuación:

- Probeta 1: cuerpo prismático de acero de bajo carbono con orificios pasantes normales a la superficie lateral en una ubicación coincidente con una diagonal (reflectores artificiales), en la Figura 3.3 se aprecian sus dimensiones.
- Probeta 2: cuerpo prismático de acero al bajo carbono con orificios pasantes horizontales (reflectores artificiales), en la Figura 3.4 se aprecian sus dimensiones.
- Probeta 3: cuerpo prismático de acero inoxidable martensítico extraído de una pieza fundida con discontinuidades (reflectores naturales), las mismas fueron provocadas por la contracción de solidificación que sufre el material durante su enfriamiento luego de la colada. Este efecto genera cavidades internas de forma, tamaño y superficie irregular, en la Figura 3.5 se aprecian sus dimensiones. Esta probeta al ser un producto bruto de colada va a presentar una microestructura que puede generar atenuación de las ondas por su gran tamaño de grano.

Las probetas 1 y 2 se fabricaron en base a las muestras de análisis utilizadas en diferentes bibliografías relacionadas con la temática y utilizadas para el estudio de SAFT (Skjeltvareid, 2012), (Barkefors, 2010), (Stepinski, 2007a).

Todas las experiencias se realizaron con la técnica pulso-eco de ultrasonido y en modo de contacto entre el transductor y la probeta, utilizando siempre como acoplante alcohol en gel.

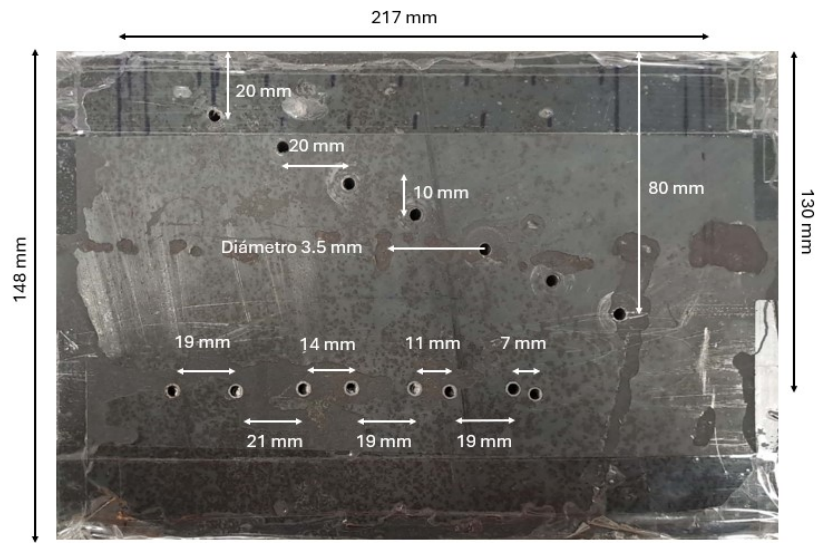


Figura 3.3: Probeta 1.

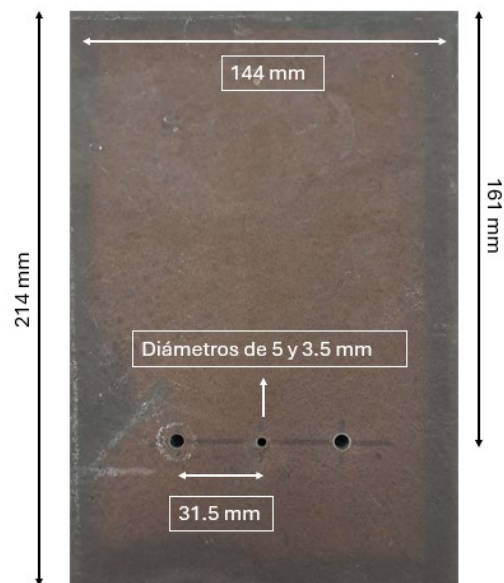


Figura 3.4: Probeta 2.

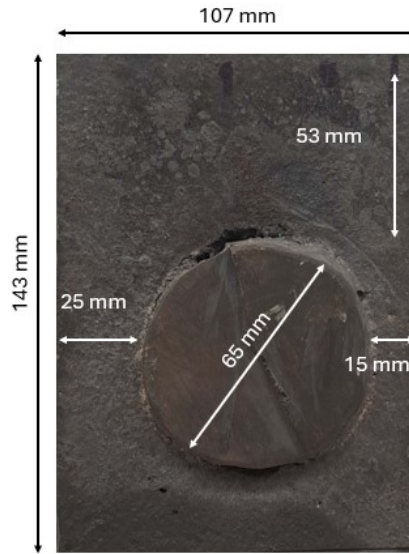


Figura 3.5: Probeta 3.

3.2. Caracterización del transductor y de las probetas de estudio

En las primeras experiencias se realizó la caracterización del transductor y de las probetas de estudio, por medio de la longitud de pulso, ancho de banda (BW por sus siglas en ingles), velocidad de propagación y atenuación, entre otros.

- Caracterización del transductor: para lograr este cometido se debe realizar una medición en un cuerpo sin imperfecciones. De este análisis se obtiene una señal A-scan a la cual se le medirá el ancho temporal del pulso y posteriormente se obtendrá su espectro de frecuencias o ancho de banda utilizando la transformada de Fourier. La norma ASTM E 1065 es la encargada de estandarizar estos ensayos. También se calculará la dimensión del campo próximo y la divergencia del haz.
- Caracterización de las probetas: para determinar la velocidad del ultrasonido en las probetas esta debe contar con caras paralelas, un mecanizado que asegure una buena terminación superficial y dicho espesor debe ser conocido. Se debe obtener una señal A-scan en donde aparezcan más de un eco correspondientes al espesor de la pieza. A partir de esta señal y por medio de una correlación cruzada se obtiene la separación temporal

entre los ecos, y con el espesor conocido se puede calcular la velocidad de propagación de la onda ultrasónica. También es de interés poder caracterizar la atenuación que las ondas sufren al propagarse en los diferentes materiales. El coeficiente de atenuación se determinó a partir del decaimiento de 2 ecos de fondo sucesivos de la señal analizada y se expresa en dB/mm, porque permite un rápido ajuste del equipo a los operarios a la hora de hacer correcciones por atenuación. Para su cálculo se utiliza la ecuación 3.1, siendo v_1 y v_2 la amplitud de los ecos de análisis y e el espesor del material analizado.

$$\alpha_{dB/mm} = \frac{20}{2 \cdot e} \cdot \log \cdot \frac{v_1}{v_2} \quad (3.1)$$

Para calcular la longitud del pulso de un transductor o su ancho temporal se seleccionan los picos de máxima y mínima amplitud. Con la ecuación 3.2 se calcula una caída de amplitud de -20 dB, siendo v_1 y v_2 los picos de máxima y mínima amplitud. Luego se trazan líneas horizontales en los valores correspondientes y las partes del pulso que intersecten esta líneas se consideran parte del mismo. Un representación gráfica de esta situación se aprecia en la Figura 3.6.

$$\Delta dB = 20 \cdot \log \cdot \frac{v_1}{v_2} \quad (3.2)$$

Para estimar el ancho de banda y la frecuencia central se debe encontrar las frecuencias que corresponden a una caída de -6 dB, lo que representa una disminución del 50 % de la amplitud.

La frecuencia central (f_c) se calcula según la ecuación 3.3 y el ancho de banda (BW) con la ecuación 3.4, siendo f_l y f_u las frecuencias a -6 dB. La ejemplificación gráfica de se observa en la Figura 3.7 (ASTM, 1999.)

$$f_c = \frac{f_l + f_u}{2} \quad (3.3)$$

$$BW(\%) = \left(\frac{f_u - f_l}{f_c} \right) \cdot 100 \quad (3.4)$$

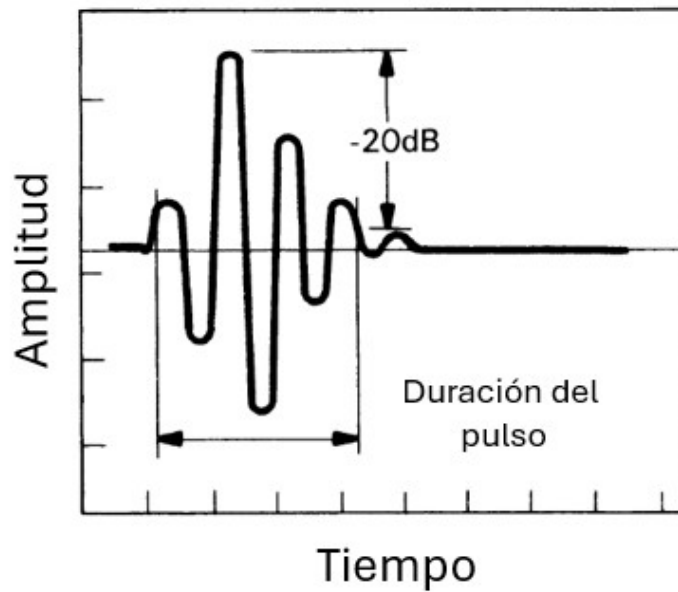


Figura 3.6: Longitud del pulso (ASTM, 1999).

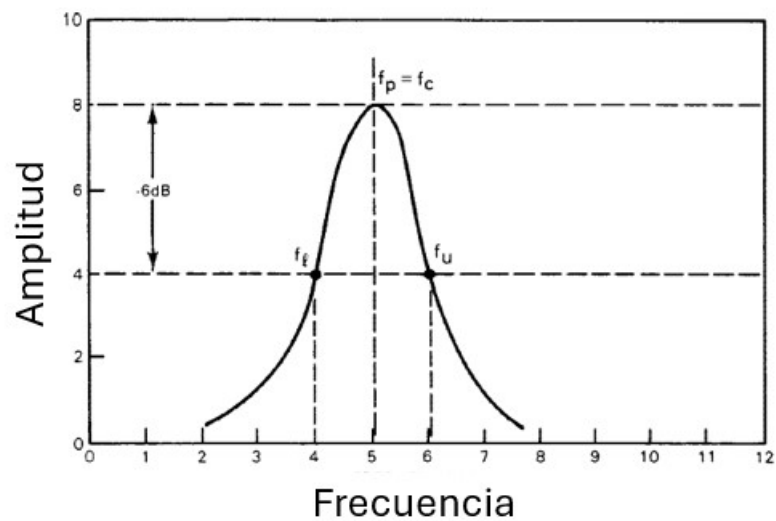


Figura 3.7: Ancho de banda (ASTM, 1999).

3.3. Análisis de probetas con reflectores

Al igual que en el resto de los ensayos estas probetas fueron analizadas utilizando el transductor en modo de contacto. De manera genérica se buscó obtener una representación B-scan mejorada de las probetas, tendiendo a una represen-

tación SAFT. En la Figura 3.8 se puede apreciar una representación de cómo se ubicó el transductor y cómo fue su desplazamiento respecto a la probeta.

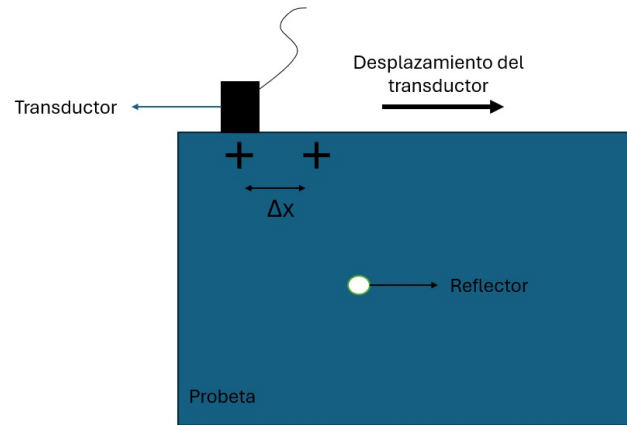


Figura 3.8: Esquema de toma de señales.

Para cada punto de medición de la probeta se obtuvo una señal A-scan, la separación de estas medidas (Δx) fue variando y haciéndose cada vez más pequeña dentro de las posibilidades prácticas. Dada la importancia de la exactitud en dicha medida y para poder mantener siempre la misma separación entre ellas, se utilizó como posicionador un conjunto de tuercas fijas con un tornillo móvil el cual presentaba una rosca métrica con un paso de 1,5 milímetros. Finalmente para los ensayos finales se fijó un Δx de 3 milímetros, el cual asegura un buen número de señales adquiridas y una buena discretización.

3.3.1. Procesamiento

Como se comentó anteriormente al adquirir la señal con el osciloscopio a partir de la derivación en el cable LEMO-00, la misma no es de buena calidad por lo cual se debe procesar para lograr una señal representativa de la probeta de estudio. A continuación se presenta y detalla algunos de los procesamientos realizados para mejorar las señales y generar la imagen ultrasónica.

- Cargado de señales y generación de matriz de datos: a partir de este momento las señales se trabajan en forma matricial para ir aproximándonos a la representación de una imagen.
- Cortado de la señal: se debe cortar o restar el inicio de la señal donde se encuentra el campo próximo, para descartar dicha región donde hay

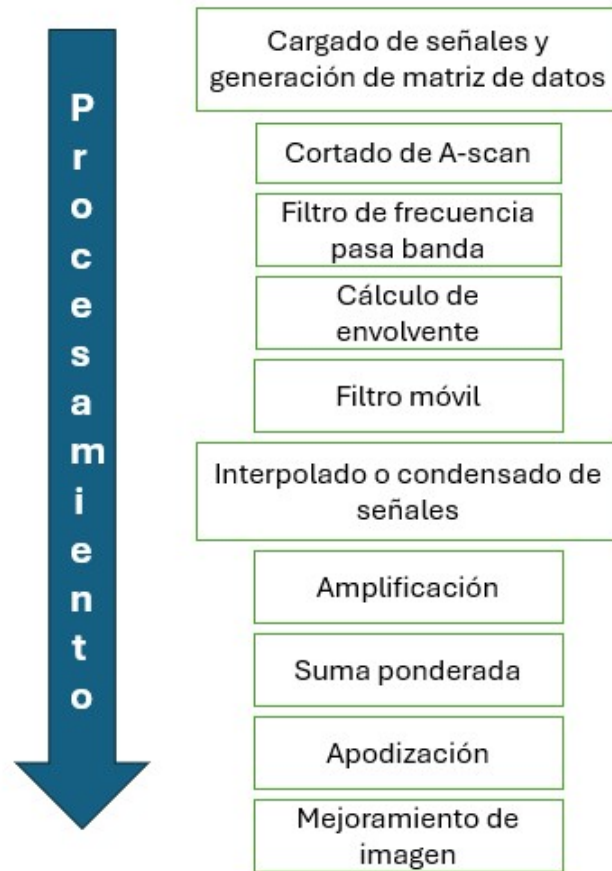


Figura 3.9: Secuencia del procesamiento.

grandes variaciones de amplitud, la cual limita la visualización del resto de la señal.

- Filtro pasa banda: filtrado de frecuencia que se aplica a cada A-scan con una frecuencia de corte inferior y superior.
- Cálculo de la envolvente de la señal: hay diversas funciones para su obtención, se busca eliminar los cambios rápidos de amplitud y que esta quede representada por la curva envolvente de la señal.
- Filtro móvil: es una técnica de procesamiento de señales que consiste en reemplazar cada valor de la señal por el promedio de un conjunto de muestras vecinas dentro de una ventana deslizante. En el análisis de ondas, este filtro se utiliza para atenuar componentes de alta frecuencia asociadas al ruido, permitiendo resaltar las componentes de baja frecuencia relacionadas con la forma general de la onda. Como consecuencia, se obtiene una señal más suave, facilitando la identificación de tendencias,

patrones de propagación y características relevantes de la señal temporal.

- Interpolación o condensado de la señal: dependiendo del caso puede ser necesario agregar mayor cantidad de datos o reducirlos para lograr un código más ágil sin perder calidad de la información.
- Amplificación de la señal: se utiliza para la corrección de la atenuación que sufre la señal al recorrer el medio de estudio.
- Suma ponderada: aplicar código donde se realice la suma ponderada para lograr magnificar las indicaciones, mejorar su resolución y ajustarlas de mejor manera a su dimensión real.
- Apodización: su objetivo es reducir los efectos no deseados y maximizar los datos de interés por medio de la multiplicación de la señal original por una función de ventana.
- Mejoramiento de imagen: aplicar filtros de imagen para eliminar distorsiones o para suavizar la imagen.

3.3.1.1. Procesamiento de Suma Ponderada

A continuación, se detallará de manera más profunda la idea propuesta para realizar la suma ponderada utilizada en el procesamiento. Como se puede observar en la Figura 3.10, la representación B-scan está constituida por una matriz de datos de donde cada columna representa un A-scan obtenido durante las mediciones con el transductor. A su vez cada elemento de la matriz representa un pixel de la imagen y se corresponde con una porción de la probeta analizada asumiendo la velocidad constante en el medio.

El haz ultrasónico de los transductores utilizados genera un campo que no es focalizado, al contrario es un campo divergente y la divergencia aumenta con la profundidad de inspección. Por lo cual toda la información que le llega al transductor puede provenir de un reflector que este contenido dentro del campo sónico. Dicho en otras palabras el transductor puede estar ubicado en la fila 6 de la matriz (rectángulo amarillo) y estar captando información de un reflector situado en las filas 5 o 7, parte de esto es lo que genera las hipérbolas características de los reflectores en la representación B-scan.

A partir de la idea expresada anteriormente, la suma ponderada analiza cada elemento de la matriz o los elementos seleccionados por el operador (cuadrado rojo) y evalúa cómo es el campo sónico (cono azul) correspondiente para dicha posición y busca en un entorno definido (elipse verde) los elementos que

podrían aportar información, ponderándolos con un valor alto si están muy cerca del elemento analizado y disminuyendo su valor de ponderación a medida que se alejan del punto de interés.

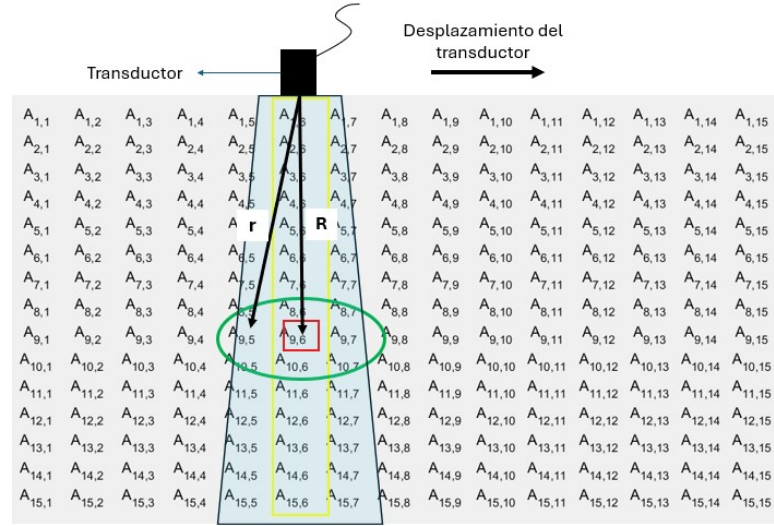


Figura 3.10: Suma ponderada

A la matriz de datos que se le realizara la suma ponderada, debe tener aplicado filtro de frecuencia, filtro móvil, cálculo de envolvente, sustracción del eco inicial de acoplamiento y en caso de ser necesario el condensado de los datos. A su vez es importante conocer la velocidad acústica del material, ángulo de divergencia del transductor, frecuencia temporal de muestreo de los datos que componen el A-scan y separación espacial entre cada A-scan obtenido. El algoritmo recorre toda o parcialmente la matriz de datos y a cada elemento lo correlaciona con la ubicación espacial dentro de la probeta utilizando la información de la velocidad ultrasónica, frecuencia de muestreo temporal y espaciado espacial entre mediciones A-scan.

Continuando con el ejemplo anterior de la Figura 3.10, cuando se analice la columna 6 de la matriz de datos y en particular se le quiera aplicar la suma pondera al elemento $A_{9,6}$, se debe calcular el radio R entre la ubicación del transductor y dicho elemento. En función de ese radio y de la divergencia del haz ultrasónico se puede calcular una ventana horizontal de búsqueda que contiene a los elementos de la matriz que están dentro del campo acústico para dicha profundidad. Estos elementos son los que aportan información en el A-scan y esta ventana horizontal no es constante, ya que varia a medida que cambia la profundidad R . Para definir una región de búsqueda en el algoritmo

falta definir una ventana vertical, la misma se puede calcular o definir a partir de la longitud del pulso ultrasónico o simplemente con una relación respecto a la ventana horizontal.

Al tener un área de búsqueda definida se deben evaluar todas las celdas contenidas y para cada una de ellas se debe calcular el valor del radio r respecto a la ubicación del transductor. Para las celdas que cumplan que $r \cong R$, se toma el valor de la señal y se le suma a la celda central del análisis de manera ponderada. Las celdas que cumplan la igualdad de radio y que estén muy próximas a la celda central se le da una ponderación alta a su valor y a medida que se encuentran celdas que cumplen la igualdad de radios, pero están lejos de la celda central se le da una ponderación menor. Es importante llevar un contador dentro del código para registrar las veces que se cumplen las igualdades de radio para una celda definida, con el fin de poder promediar el valor final que se le dará a la celda central.

3.3.2. Medición de SNR y CNR en imágenes B-scan

Se evaluó el mejoramiento de las imágenes ultrasónicas antes y después del procesamiento, con el cálculo del SNR y CNR. Para dicho estudio es importante definir el área de la señal de interés (discontinuidad) y la del ruido. Para el área de la señal se partirá de un rectángulo el cual contenga completamente la representación de la discontinuidad en la imagen y para el área del ruido un rectángulo de igual dimensión próximo al área de la discontinuidad. Una ejemplificación de esta idea se puede apreciar en la Figura 3.11, donde el rectángulo rojo representa la región de interés y el rectángulo verde la del ruido.

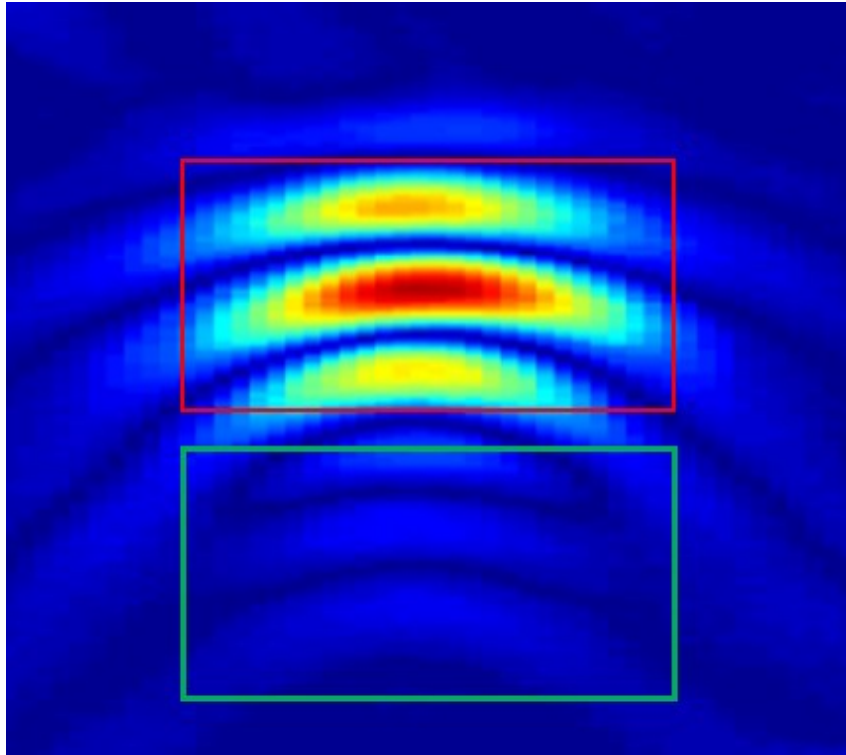


Figura 3.11: SNR y CNR.

3.4. Comparación de resultados

Para poder ver la eficacia de los resultados obtenidos se analizaron las mismas probetas pero con un equipo comercial SIUI SMARTOR ULTRASONIC FLAW DETECTOR, el cual presenta la posibilidad de analizar materiales por medio de la representación B-scan. Particularmente en la probeta 3 también se realizó un ensayo radiográfico de la misma para comparar los resultados obtenidos con otro método de ensayo como la Radiografía Industrial. En esta instancia la experiencia se realizó conjuntamente con la empresa SIIT SERVICIOS INDUSTRIALES que brinda END para la industria.

Por otra parte, el código de procesamiento de señales se utilizó para analizar datos obtenidos con el Georadar del Instituto de Estructuras y Transportes de la Facultad de Ingeniería. Esto se realizó para poder ver cómo funciona o comporta el algoritmo desarrollado en otra área de la industria y con datos provenientes de ondas electromagnéticas.

3.4.1. Ensayo de Radiografía

A continuación, en la Tabla 3.1 se detallan los parámetros utilizados para la inspección de la probeta 3 por medio de Rx. Se realizaron 3 ensayos variando la exposición para poder evaluar diversas placas y seleccionar el mejor resultado.

Tabla 3.1: Parámetros de ensayo Rx

Parámetro	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Exposición	75 mA.Minuto	40 mA.Minuto	20 mA.Minuto
Film	R7 FOMADUX	R7 FOMADUX	R7 FOMADUX
Distancia Foco Película	150 mm	150 mm	150 mm
Tensión de trabajo	160 kV	160 kV	160 kV

En la Figura 3.12 se puede observar el montaje necesario para realizar el ensayo de radiografía y en la Figura 3.13 se muestra como es la propagación de los rayos para poder interpretar la placa radiográfica.



Figura 3.12: Montaje para ensayo de Rx.



Figura 3.13: Propagación de Rx.

3.4.2. Composición de B-scan 360°

En la probeta 3 al ser inspeccionada mediante radiografía se obtuvo como resultado una placa radiográfica en la cual se puede apreciar la discontinuidad como una proyección, donde se observa por completo la forma y tamaño de la misma. Para simular los resultados obtenidos se realizaron cuatro inspecciones ultrasónicas a la probeta, una por cada cara lateral, luego se procesaron los resultados para obtener una versión B-scan mejorada. A partir de estos cuatro B-scan se realizó una composición de las imágenes para obtener un B-scan 360° y poder evaluar los resultados con los de la placa radiográfica. Unir las cuatro matrices correspondientes a los B-scan conlleva la rotación y ajuste de las mismas en sus dimensiones ya que los A-scan adquiridos son del orden de las decenas y cada señal contiene miles de datos.

3.4.3. Georadar

El Georadar o GPR (por sus siglas en inglés, Ground Penetrating Radar) es un equipo y ensayo utilizado en la ingeniería civil, para la evaluación del estado de las estructuras de hormigón armado entre otras. El principio físico del GPR consiste en la emisión de pulsos de ondas electromagnéticas hacia el medio de análisis y la recepción de posibles reflexiones producidas por las variaciones

de las propiedades electromagnéticas del material. El equipo cuenta con dos antenas, una emisora y otra receptora. La antena emisora genera un pulso electromagnético que se transmite por el interior de un medio y es reflejado por toda superficie que presente una impedancia eléctrica diferente. La antena receptora capta reflexiones provenientes de distintas interfases o reflectores. Cada señal adquirida en un determinado punto genera un A-scan y el conjunto de todas las señales adquiridas con un determinado muestreo espacial conforma la representación B-scan. Para esta instancia se procedió a evaluar los datos obtenidos por el GPR al inspeccionar una losa de hormigón con reflectores y procesarlos por medio del algoritmo diseñado para poder comparar el B-scan obtenido con el generado por el GPR.

Capítulo 4

Presentación de Resultados, Análisis y Discusión

4.1. Caracterización del transductor Ultrasónico

A continuación se pueden observar los resultados obtenidos de la caracterización del transductor, un comentario importante para esta sección es que la caracterización se hizo utilizando el transductor en modo de contacto sobre el cuerpo, mientras que las caracterizaciones que realizan los fabricantes son mayoritariamente en modo de inmersión.

En la Figura 4.1 se presenta el resultado de analizar gráficamente el ancho temporal del pulso, donde se observa que el mismo es de 2,61 microsegundos.

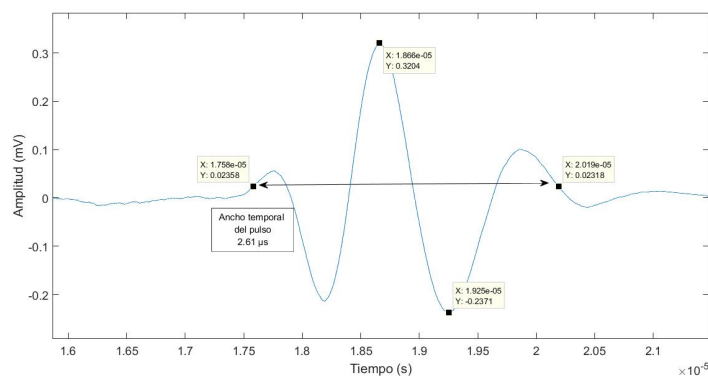


Figura 4.1: Ancho temporal del pulso ultrasónico.

Al analizar el espectro de frecuencias (Figura 4.2) lo primero que se puede apreciar es una variación de la frecuencia central del transductor con la especificada por el fabricante (punto marcado en figura), siendo estas de 0.87 y 1 MHz respectivamente. Es importante conocer el ancho de banda ya que a partir de estos valores uno puede ajustar los filtros pasa banda utilizados en el procesamiento de señales.

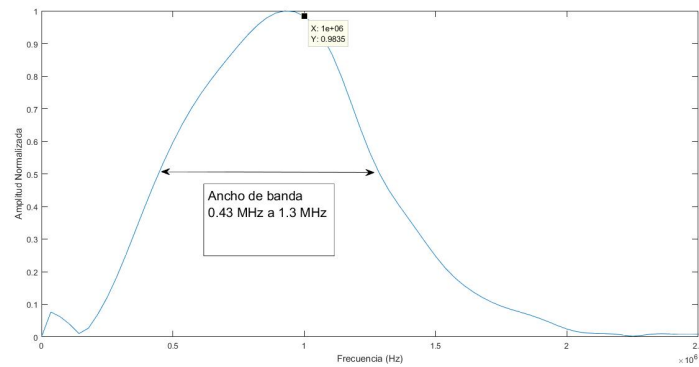


Figura 4.2: Espectro de frecuencias del transductor.

En la Tabla 4.1 se encuentran resumidas las diferentes características del transductor con el agregado de la divergencia del haz y el campo próximo.

Tabla 4.1: Características del Transductor.

Característica	Valor
Ancho temporal	2.61 μ s
Frecuencia central	0.87 MHz
Ancho de banda (-6 db)	100.6 %
Campo próximo	0.015 m
Divergencia	24.1 °

Se compararon los resultados obtenidos con los datos de un transductor OLYMPUS de 1 MHz y 0,75 pulgadas de diámetro. Se pudo constatar que el ancho temporal de ambos pulsos es prácticamente el mismo presentando un diferencia de 0,05 microsegundos. En el espectro de frecuencias sí se notaron diferencias, la frecuencia central del transductor OLYMPUS corresponde con 1 MHz y el ancho de banda es del 68 %.

4.2. Caracterización Ultrasónica de Probetas

A continuación se presentan los resultados de la caracterización de los materiales que constituyen las probetas de estudio. Estos resultados incluyen la determinación de la velocidad de propagación de las ondas en los diferentes materiales y la atenuación característica de cada uno de ellos.

En la Figura 4.3 se presentan los resultados gráficos del análisis al acero inoxidable, se aprecian tres ecos de fondo sucesivos los cuales son originados por la pared opuesta a la de inspección. Entre ellos se observan pequeñas variaciones de amplitud producto del tamaño de grano grueso o pequeñas imperfecciones naturales del elemento.

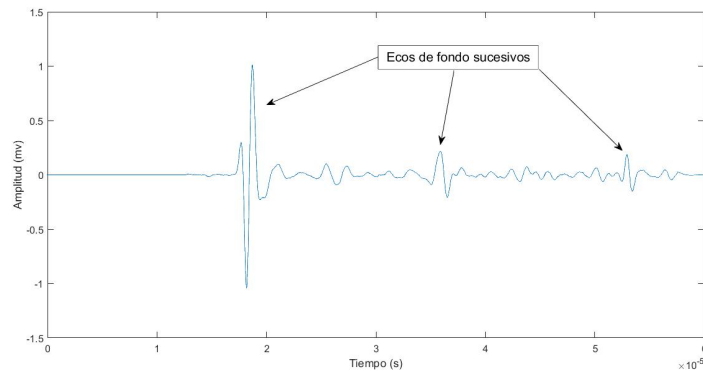


Figura 4.3: Ecos de fondo sucesivos en A-scan.

En la Figura 4.4 se aprecia el resultado de la autocorrelación cruzada, dando la separación temporal entre los sucesivos ecos. Este tiempo es utilizado para calcular la velocidad de propagación conjuntamente con el espesor de la probeta.

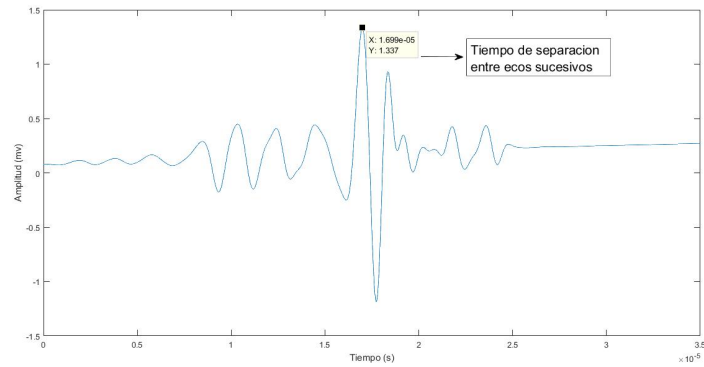


Figura 4.4: Resultado de la correlación de ecos de fondo.

Para el cálculo de la atenuación se presentan los resultados obtenidos para el acero al carbono, donde se puede ver que la atenuación se corresponde con un decaimiento exponencial como lo sugiere la teoría, lo cual se observa en la Figura 4.5.

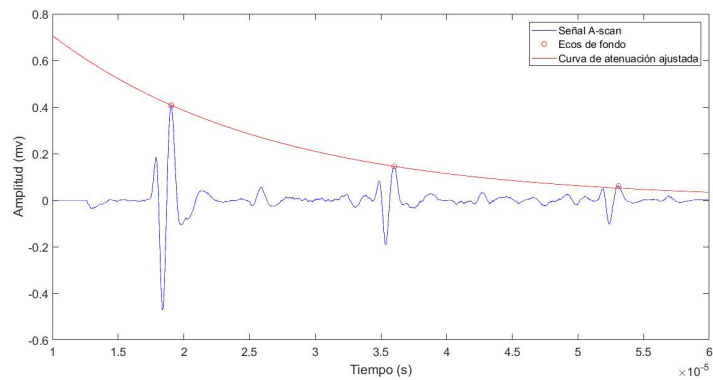


Figura 4.5: Señal A-scan con curva de atenuación ajustada.

En la Tabla 4.2 se expresan los resultados numéricos obtenidos donde se puede apreciar que el coeficiente de atenuación es mayor para la pieza de acero inoxidable. Esto concuerda con su microestructura la que corresponde a la de un acero bruto de colada o directo de la fundición con grano grueso.

Tabla 4.2: Caracterización ultrasónica de los aceros.

Material	Velocidad (m/s)	Atenuación (dB/mm)
Acero al carbono	5889	0.21
Acero inoxidable	6357	0.29

Los valores obtenidos de velocidad de propagación de onda están en el orden

de los sugeridos para estos materiales según la Asociación Española de Ensayos No Destructivos (AEND), los cuales rondan los 5820 y 7390 m/s para aceros de baja aleación y acero inoxidable martensítico AISI 410. El AISI 410 no es el mismo acero que el de la probeta 3 pero es de la familia, es importante remarcar que estos tipos de aceros pueden tener grandes diferencias en su composición química lo que modifica su velocidad característica (Cunat, 2003).

4.3. Análisis de Probetas con Reflectores

En esta sección se hace referencia a los resultados obtenidos de las probetas 1, 2 y 3, en lo que refiere al análisis de las mismas por medio del procesamiento desarrollado en este trabajo. Se expondrán resultados con distinto grado de procesamiento pero de manera general se hará referencia al los términos procesado parcial y total, los cuales se exponen en la Figura 4.6 .

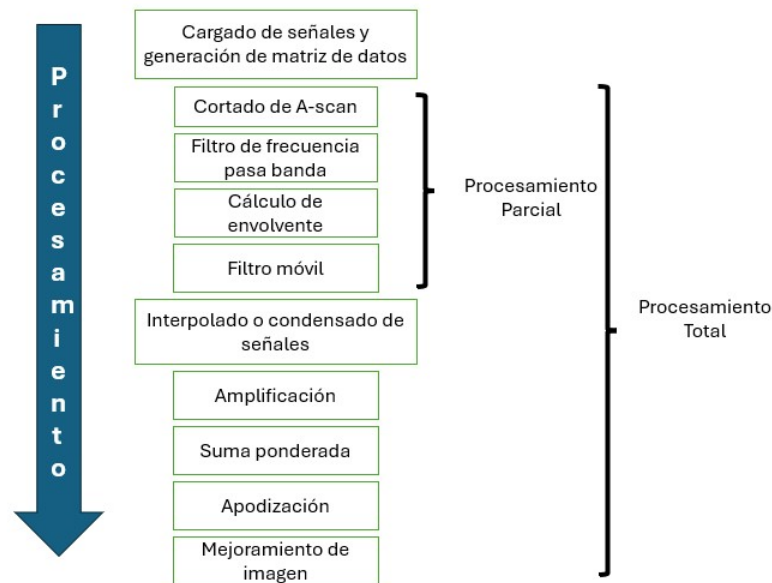


Figura 4.6: Procesamiento parcial y total.

4.3.1. Probeta 1

En esta sección se presentarán los resultados obtenidos en los pasos más importantes del procesamiento de las señales para lograr tener una representación B-scan. También se irán discutiendo y analizando las mejoras obtenidas. Para comenzar en la Tabla 4.3 se detallan algunos de los parámetros mas relevantes, dentro de los cuales se aprecia la frecuencia espacial de muestreo o de manera más simple la separación entre las medidas A-scan. En los primeros ensayos se comenzaron las experiencias con medidas mayores, del del orden de 10 milímetros. Luego se fueron disminuyendo hasta llegar al Δx de 3 milímetros el cual cumple con los teoremas de muestreo y es aplicable prácticamente en un desplazamiento del transductor de manera manual.

Tabla 4.3: Parámetros de ensayo.

Característica	Valor
Frecuencia transductor	0.87 MHz
Diámetro transductor	20 mm
Frecuencia temporal de muestreo	0.25 GHz
Frecuencia espacial de muestreo	3 mm
Velocidad de propagación US	5889 m/s

Las señales adquiridas directamente a partir de la derivación implantada en nuestro montaje experimental no son aptas para generar una representación B-scan, ya que la información de interés está opacada u oculta por ruido y otras perturbaciones de gran amplitud.

A modo representativo en la Figura 4.7 se presenta una señal A-scan graficada directamente luego de su adquisición. Donde se observa el inicio de la señal con una gran amplitud, la cual se denomina eco de acoplamiento pero es la combinación del *crosstalk* y de la reflexión en la interfaz de acoplamiento.

Luego aplicándole filtros de frecuencia pasa banda, cálculo de la envolvente de la señal y filtro móvil se obtienen señales donde las respuestas generadas por los reflectores son más notorias, como en la Figura 4.8.

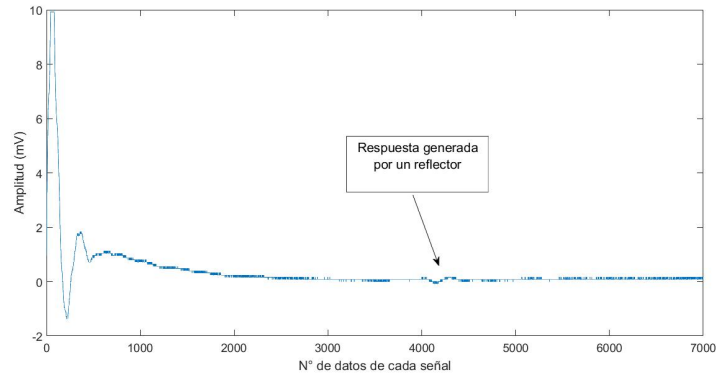


Figura 4.7: Señal A-scan pura.

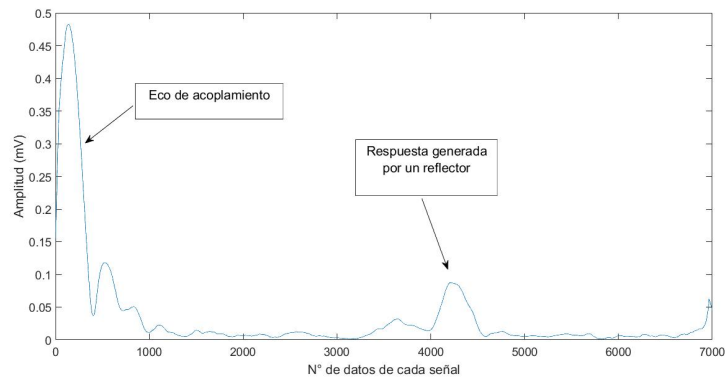


Figura 4.8: Señal A-scan mejorada.

Posteriormente todas las señales A-scan se deben agrupar para poder generar la representación B-scan de la probeta de estudio. Al realizar dicho agrupamiento es importante realizar la conversión de los ejes, todos los A-scan agrupados uno al lado del otro deben representar la longitud de la probeta recorrida por el barrido del transductor. Y todos los puntos dentro de cada señal se deben transformar en espesor de material recorrido por la onda ultrasónica. En esta última es necesario conocer la frecuencia del muestreo, la velocidad del ultrasonido en el material de estudio y la idea de que la onda recorre el doble de espesor ya que estamos utilizando la técnica pulso-eco. En la Figura 4.9 se puede observar el B-scan obtenido a partir de las señales A-scan sin procesamiento con la sustracción (resta) del eco inicial.

El eco de acoplamiento siempre es de gran magnitud, lo que genera una disminución de la apreciación del resto de la señal, por lo cual es aconsejable sustraerlo o eliminarlo directamente de todos los A-scan. Los reflectores diagonales son muy poco notorios lo que limita su detección aun estando en

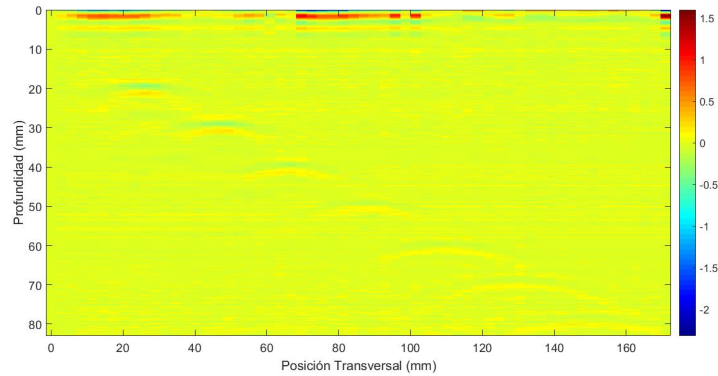


Figura 4.9: Representación B-scan sin procesamiento.

condiciones de laboratorio, esta situación sería peor al inspeccionar componentes en sitio.

En la Figura 4.10 se puede ver el resultado de unir todos los A-scan para formar una imagen con sus respectivos ejes los cuales representan las dimensiones de la probeta 1. Dichas señales ya tienen aplicado un procesamiento parcial, de lo contrario no sería posible identificar a los reflectores. Si se observa con mayor detenimiento se puede notar que los reflectores de la probeta generan indicaciones con forma de hipérbolas como se explicó en el marco teórico. Las mismas provocan una pérdida de resolución lateral ya que un reflector puntual está representado con una indicación de mayor dimensión. Se debe notar que a medida que aumenta la profundidad del reflector también aumenta el tamaño de las hipérbolas y disminuye su amplitud, esto es causado por la divergencia y la atenuación del haz.

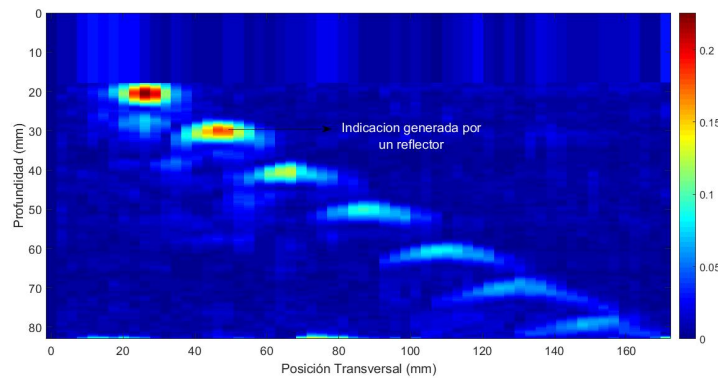


Figura 4.10: Representación B-scan.

Ahora, si observamos la Figura 4.11 se puede notar un mejoramiento de la resolución, al aplicar el procesamiento completo de las señales. Se genera un aumento de las amplitudes de los reflectores mediante la suma ponderada y apodización de señales A-scan.

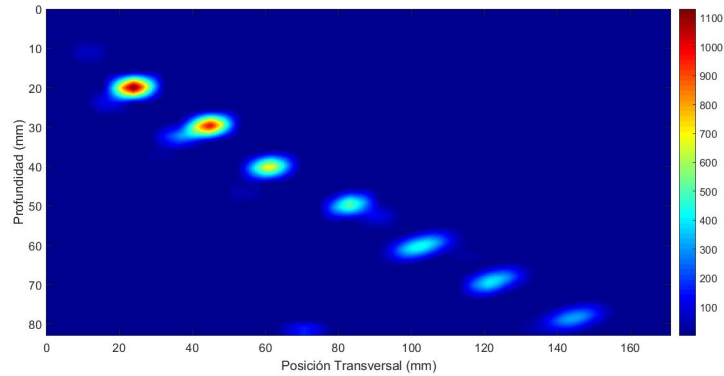


Figura 4.11: Resultado del procesamiento total.

En la Figura 4.12 se muestra el resultado del análisis de una única señal A-scan la cual contiene la indicación de un reflector. Si analizamos el aumento de la amplitud de la señal en base a la suma ponderada obtenemos un crecimiento del 12 %, lo que posibilita una mejor detección de las discontinuidades. En dicha imagen la señal 1 corresponde a la representación B-scan de la Figura 4.10 y la señal 2 es el mismo A-scan al cual se le terminó de aplicar el procesamiento de suma ponderada.

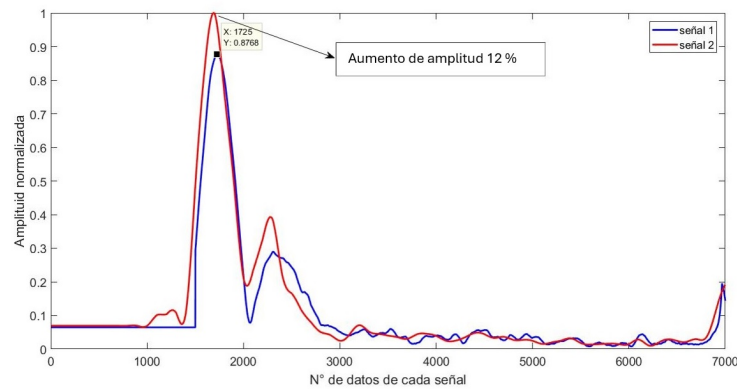


Figura 4.12: Comparación de señales A-scan.

Para finalizar el análisis de la probeta 1 y ver la concordancia en la ubicación de los reflectores se superpone parcialmente la imagen digital de la probeta sobre la imagen generada con ultrasonidos, lo cual se ve en la Figura 4.13.

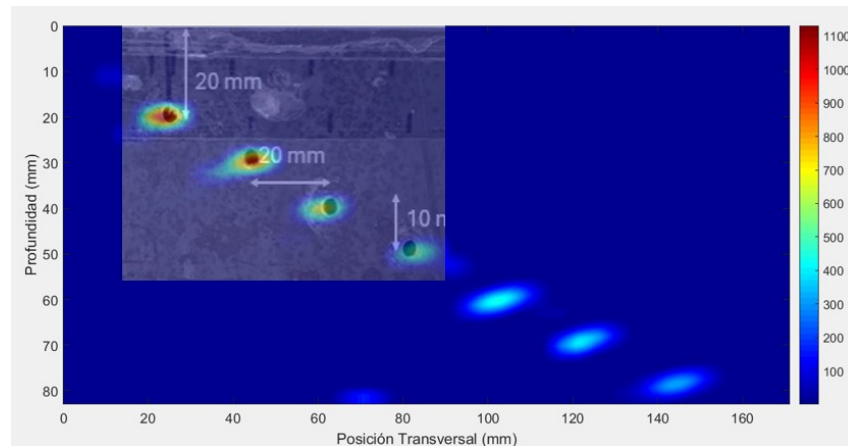


Figura 4.13: Comparación imagen ultrasónica con digital.

Para obtener una estimación del tamaño se utilizó el criterio de ± 6 dB recomendado en la norma UNIT-NM 336:2012 para Ultrasonido en soldadura. Al aplicar este criterio directamente en la imagen para determinar la dimensión de los reflectores se obtiene que el tamaño es del orden de 10 a 15 mm, siendo el diámetro real del orificio 3,5 mm. Esta dificultad en lograr dimensionar de manera correcta el tamaño de los reflectores viene dada por los efectos de la dispersión de Rayleigh. Según este fenómeno para lograr dimensionar de manera correcta un reflector la longitud de onda no puede ser del orden del tamaño de la discontinuidad (Seeber et al. 2018). Con el transductor de 1 MHz utilizado en las probetas de acero se genera una longitud de onda de aproximadamente 6 milímetros, lo cual duplica en tamaño del orificio.

4.3.2. Probeta 2

La probeta 2, la cual presenta los reflectores a mayor profundidad, se analizó por sus 2 caras opuestas logrando generar una inspección de los reflectores de diferente diámetro a menor y mayor profundidad. En la Tabla 4.4 se describen los parámetros de ensayo.

Se comenzó el análisis por la cara más próxima a los reflectores y para poder apreciar de mejor manera los resultados, luego de obtenidos y procesados se le realizó una ampliación a la representación B-scan. En la Figuras 4.14 y 4.15 se

Tabla 4.4: Parámetros de ensayo.

Característica	Valor
Frecuencia transductor	0.87 MHz
Diámetro transductor	20 mm
Frecuencia temporal de muestreo	100 MHz
Frecuencia espacial de muestreo	3 mm
Velocidad de propagación US	5889 m/s

pueden observar los resultados de la representación B-scan con la sustracción del eco de acoplamiento y la aplicación del filtro de frecuencia y la del B-scan procesado totalmente, respectivamente.

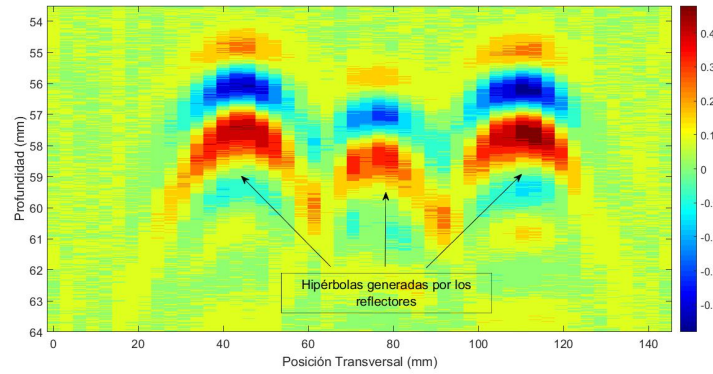


Figura 4.14: B-scan probeta 2.

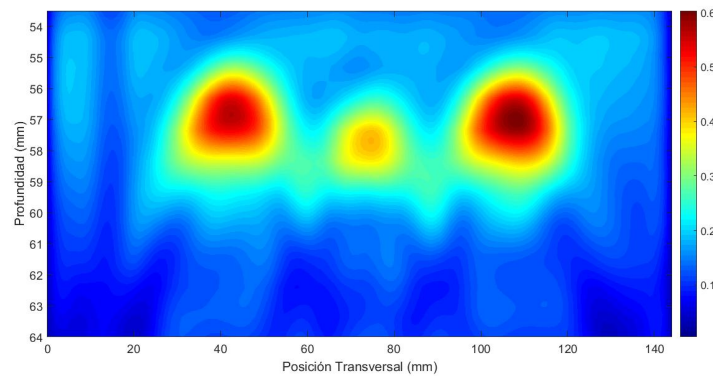


Figura 4.15: B-scan probeta 2 con procesamiento total.

Se puede apreciar de manera directa un mejoramiento de la representación de los reflectores, lo que involucra una reducción de las hipérbolas de cada uno de ellos, un aumento de la amplitud de los reflectores y como lo más

importante una separación y distinción entre los orificios de diferente diámetro. Por los motivos explicados para la probeta 1 y en base a la relación entre la longitud de onda y el tamaño de los reflectores, no es aconsejable realizar un dimensionamiento cuantitativo de los mismos.

El la Figura 4.16 se puede observar el cambio y mejoramiento de la señal A-scan por medio del procesamiento para lograr obtener la representaciones mejoradas de las probetas. La señal 1 corresponde a la señal adquirida con la aplicación de filtros de frecuencia, la señal 2 corresponde a la envolvente con aplicación de filtro móvil y la señal 3 tiene todo el procesamiento completo.

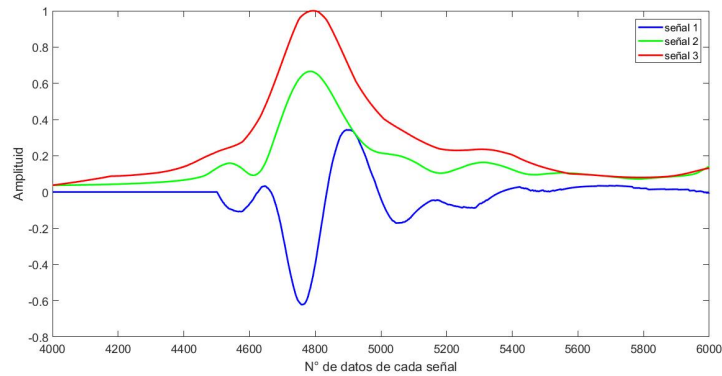


Figura 4.16: Comparación de A-scan con diferente procesamiento.

En la Tabla 4.5 se puede apreciar la variación del SNR y CNR en el B-scan procesado parcial y totalmente. Esto implica un mejoramiento de la calidad de la imagen por reducción del ruido y aumento de contraste entre la discontinuidad y la región sana.

Tabla 4.5: Variación de SNR y CNR.

Parámetro	B-scan	B-scan procesado totalmente
SNR	8.7 dB	11.1 dB
CNR	6.6 dB	13.3 dB

En la inspección por la cara lejana se tuvieron dificultades debido a la profundidad de los reflectores y la gran divergencia del transductor. Esta combinación causa que las hipérbolas de los reflectores sean muy grandes y debido a la proximidad de los mismos se genera una intersección constructiva de las hipérbolas de mayor amplitud que el propio reflector, dando una falsa indicación. En la Figura 4.17 se puede observar las dificultades nombradas anteriormente al inspeccionar la probeta 2 por el lado lejano y con el transductor de 1 MHz. La Figura 4.18 muestra el B-scan procesado totalmente, donde se tienen 3 indicaciones las cuales inicialmente parecen los tres reflectores de la probeta, pero por su ubicación la indicación central no lo es.

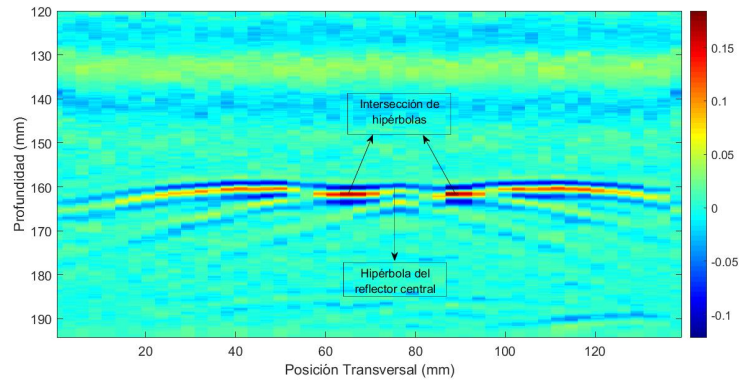


Figura 4.17: B-scan probeta 3.

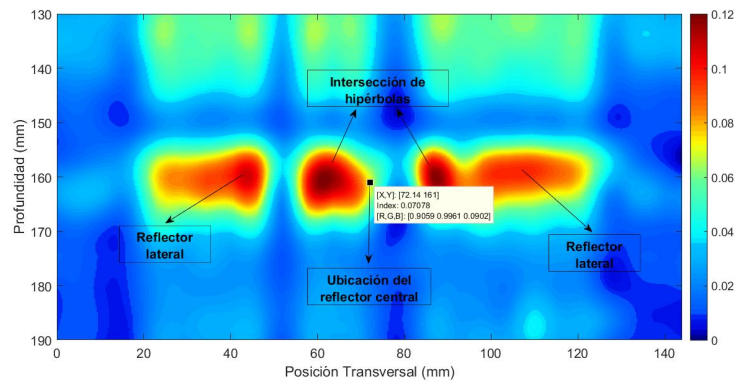


Figura 4.18: B-scan probeta 3 procesada totalmente.

Para solucionar los inconvenientes se procedió a utilizar un transductor de igual diámetro pero mayor frecuencia (2.5 MHz), con una menor divergencia del haz. La Figura 4.19 muestra los resultados obtenidos, donde se logra una buena detección de los 3 reflectores.

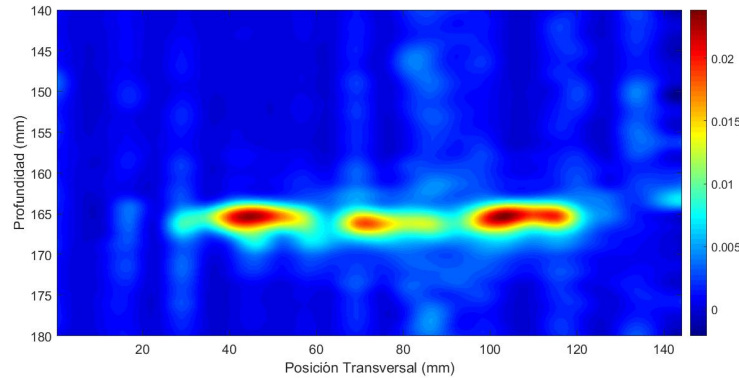


Figura 4.19: B-scan probeta 3 procesada totalmente.

4.3.3. Probeta 3

Para el análisis de esta probeta se pretendió simular condiciones semejantes a la industria donde no siempre se pueden tomar mucha cantidad de datos, por eso la separación entre las señales A-scan obtenidas se aumentó a 5 milímetros. También hay que recordar que los reflectores de esta probeta son naturales, y en muchos casos eso genera que la superficie de reflexión no sea lisa, más bien rugosa provocando una superficie dispersiva que atenúa las señales adquiridas. En la Tabla 4.6 se pueden ver los parámetros del ensayo.

Tabla 4.6: Parámetros de ensayo.

Característica	Valor
Frecuencia transductor	0.87 MHz
Diámetro transductor	20 mm
Frecuencia temporal de muestreo	0.25 GHz
Frecuencia espacial de muestreo	5 mm
Velocidad de propagación US	6357 m/s

En la Figura 4.20 se aprecia la representación B-scan obtenida con un procesamiento parcial de las señales, donde se puede apreciar el eco de fondo generado por la probeta 3. En la parte central de la probeta se nota la ausencia del eco de fondo, lo cual nos indica que la ondas ultrasónicas no están llegando a esa región. Esto se puede deber a la presencia de una discontinuidad la cual no permite que la onda siga recorriendo el material y dada su geometría y condición superficial la amplitud de su reflexión es muy baja.

Por lo descrito anteriormente se procede a hacer un análisis más detenido de la zona central de la pieza, lo que sería equivalente a hacer *zoom* y procesar

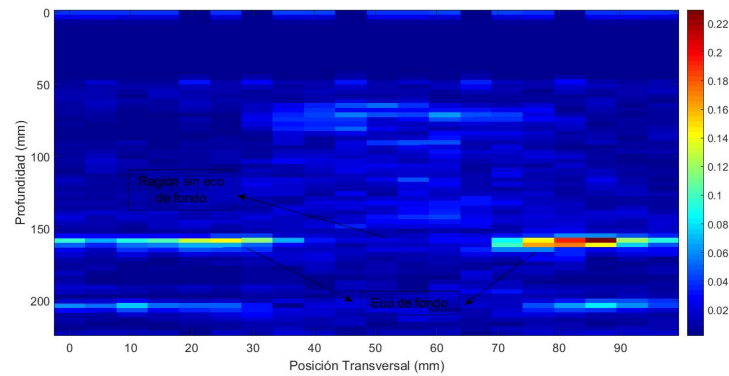


Figura 4.20: B-scan probeta 3.

posteriormente esa región. Los resultados obtenidos se pueden apreciar en la Figura 4.21 donde se observa una discontinuidad de gran dimensión. Dicha discontinuidad resulta ser un “rechupe” causado por la contracción de solidificación, lo cual es razonable debido a que el ejemplar es una pieza fundida.¹

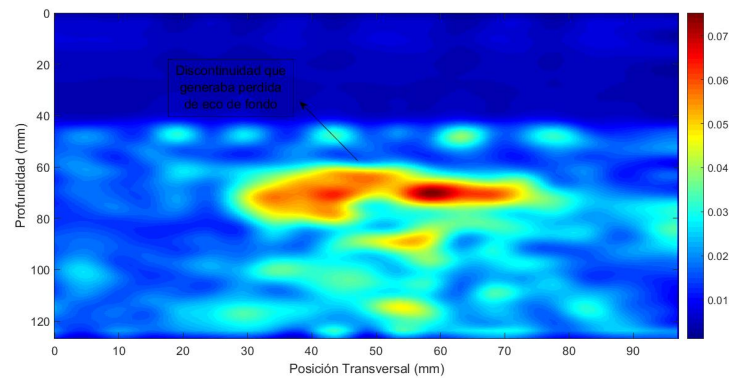


Figura 4.21: B-scan procesado totalmente.

¹Rechupe: defecto de contracción que ocurre cuando el metal se enfría y solidifica de manera desigual, dejando cavidades internas o superficiales en la pieza.

En los gráficos de la Figura 4.23 se puede apreciar el aumento de amplitud que va sufriendo la señal a causa del procesamiento. La señal 1 es un A-scan con filtros de frecuencia, la señal 2 ya representa la envolvente de la señal A-scan y la señal 3 es la que tiene todo el procesamiento completo.

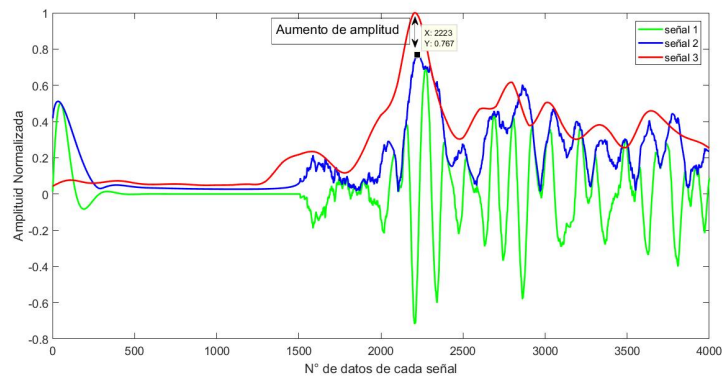


Figura 4.22: Comparación de A-scan con diferente procesamiento.

Dada la relación existente entre la longitud de onda y el tamaño de la discontinuidad, en este caso se pudo dimensionar de forma correcta el reflector. La longitud es de 46 mm, como se puede apreciar en la Figura 4.23. El valor concuerda con el obtenido durante la medición de la placa radiográfica en el negatoscopio, el cual es de 43 mm.

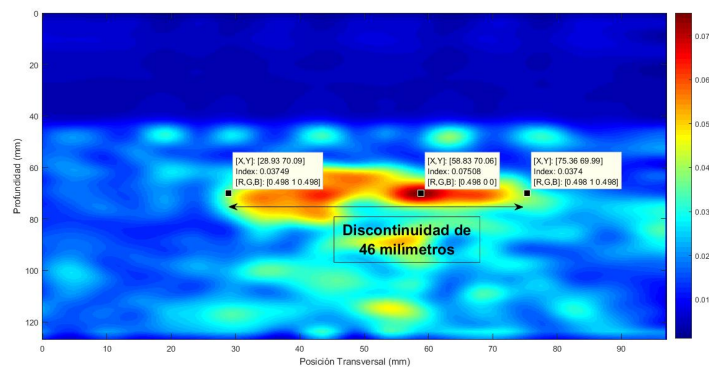


Figura 4.23: Medición de la discontinuidad.

En la Figura 4.24 se puede observar conjuntamente la parte superior de placa con el resultado del análisis por ultrasonido.

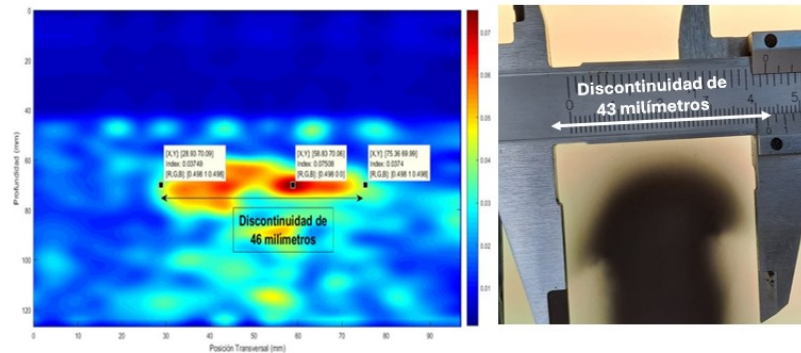


Figura 4.24: Comparación de B-scan con placa Rx.

4.4. Comparación con otros Métodos o Equipos

Para comparar los resultados obtenidos mediante la herramienta generada en este trabajo, se realizó la inspección B-scan de todas las probetas utilizando un equipo de ultrasonido comercial el cual se detalla a continuación. En todas las instancias siempre se utilizó el mismo transductor que fue el caracterizado al inicio de este capítulo.

- Equipo de Ultrasonido Industrial, Marca: SIUI y Modelo: SMARTOR UT. Este equipo es un detector de fallas de alta gama el cual tiene diversas funciones entre las cuales esta la representación B-scan.

En particular para la probeta 3 y en conjunto con la empresa SIIT se realizó un ensayo radiográfico. Este ensayo solo se le realizó en la probeta 3 ya que las discontinuidades de esta no son detectable con un ensayo visual como en el resto de los casos.

4.4.1. Probeta 1

En la Figura 4.25 subfigura derecha se aprecia el resultado de realizar el barrido de la probeta 1 para la generación del B-scan con el equipo comercial. Se logra

una buena detección de todos los reflectores con buena amplitud, pero no se logra obtener una reducción de las hipérbolas, lo cual disminuye la resolución lateral de la inspección.

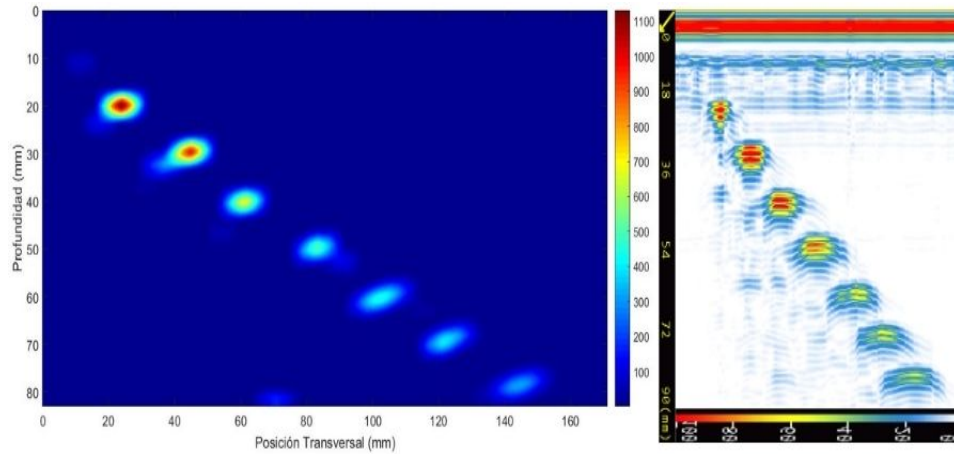


Figura 4.25: Comparación de B-scan obtenido con equipo comercial.

4.4.2. Probeta 2

De la misma manera que en la sección anterior la probeta 2 fue analizada desde la superficie más próxima y más lejana de los reflectores para poder ver las dificultades y diferencias que surgen al ir aumentando la profundidad de inspección. En la Figuras 4.26 y 4.27 se observan los resultados obtenidos de la inspección por el lado cercano y lejano respectivamente con el equipo comercial.

Se puede destacar que en la inspección B-scan por el lado cercano no se logra apreciar una diferencia entre los diferentes diámetros de los reflectores, como la que se observa en la Figura 4.28 obtenida mediante este trabajo . Luego en la inspección por la cara más alejada de los reflectores no se logra determinar ni diferenciar la presencia de 3 reflectores, debido al efecto que generan las intersecciones de la hipérbolas a dicha profundidad. Dicha indicación se podría confundir con una discontinuidad de gran extensión, en vez de 3 orificios de pequeño diámetro. Es oportuno destacar que mayoritariamente los criterios de aceptación o rechazo de las discontinuidades se basan en el tamaño, forma y ubicación de la misma.

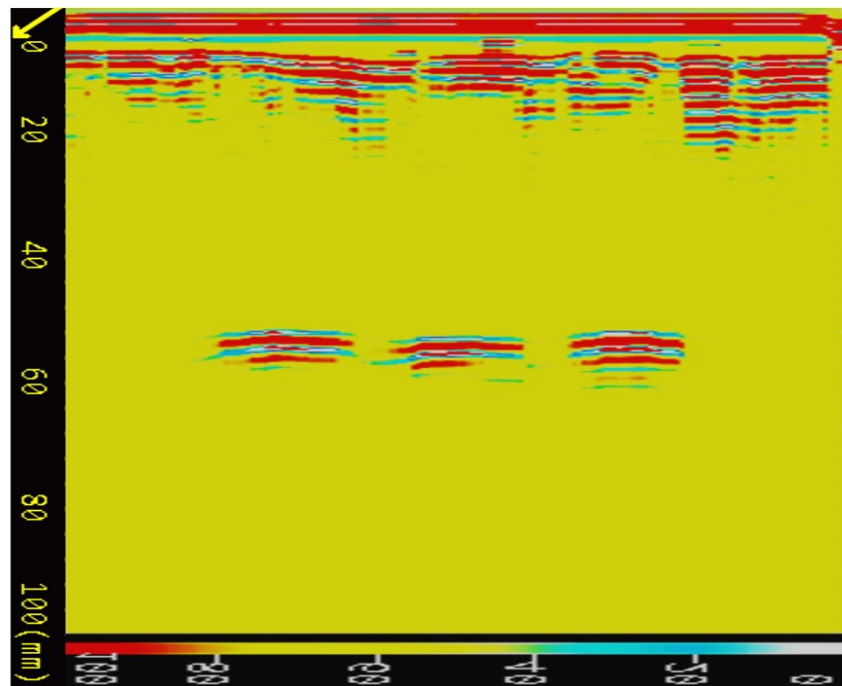


Figura 4.26: B-scan del lado cercano obtenido con equipo comercial.

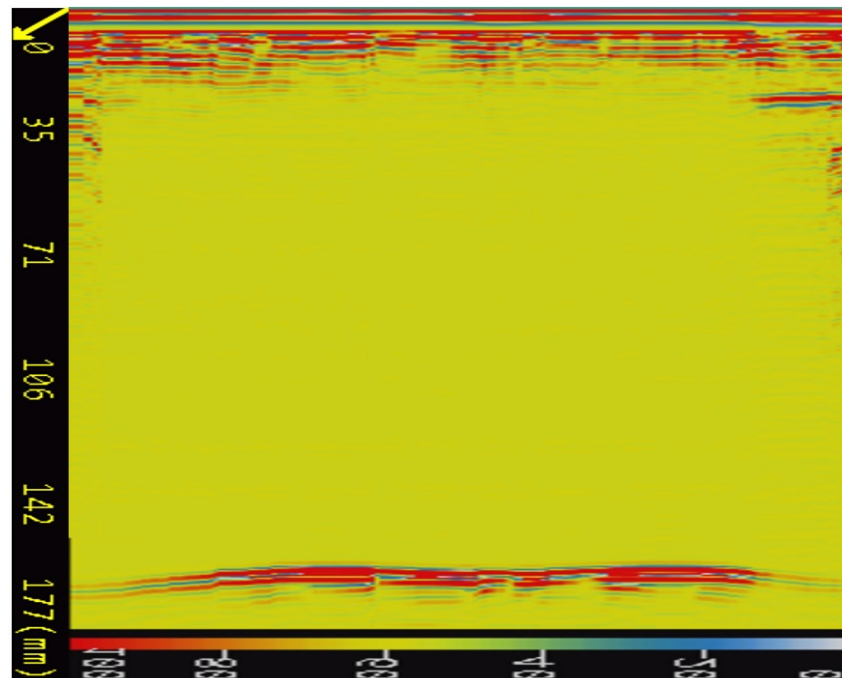


Figura 4.27: B-scan del lado lejano obtenido con equipo comercial.

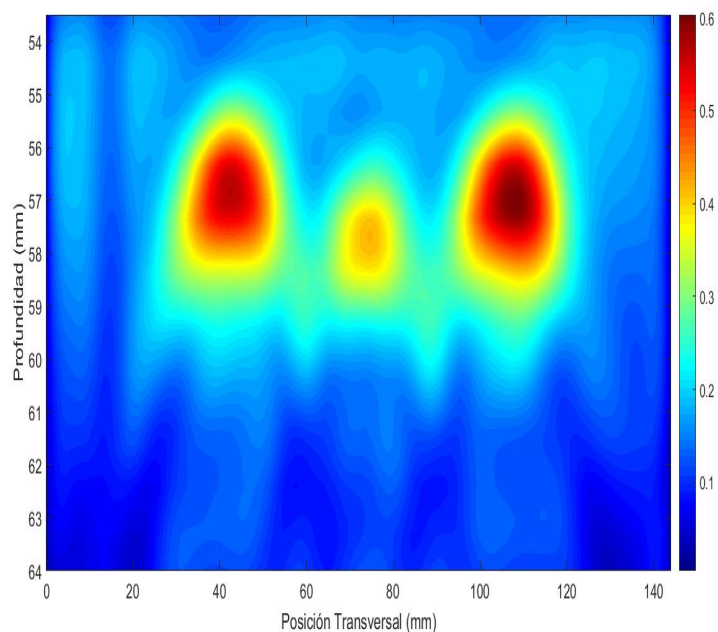


Figura 4.28: B-scan probeta 2 procesado totalmente.

4.4.3. Probeta 3

Al analizar la probeta 3 para obtener la representación B-scan se obtuvo el resultado de la Figura 4.29. Donde al tratarse de una discontinuidad o reflector de gran tamaño a pequeña profundidad se logró una representación de la misma que concuerda geoméricamente con la obtenida en la sección anterior.

Al analizar la probeta 3 por medio de rayos x se encontraron ciertas limitantes ya conocidas como el espesor de la probeta y su aleación. Ocasionando la necesidad de realizar 3 placas radiográficas para lograr obtener un resultado acorde a las exigencias industriales. En la Figura 4.30 se aprecia el mejor resultado obtenido de los 3 realizados. También se observa penumbra geométrica en la placa radiográfica, la cual es el falta de nitidez en los bordes de la discontinuidad debido a la dispersión de los rayos x.

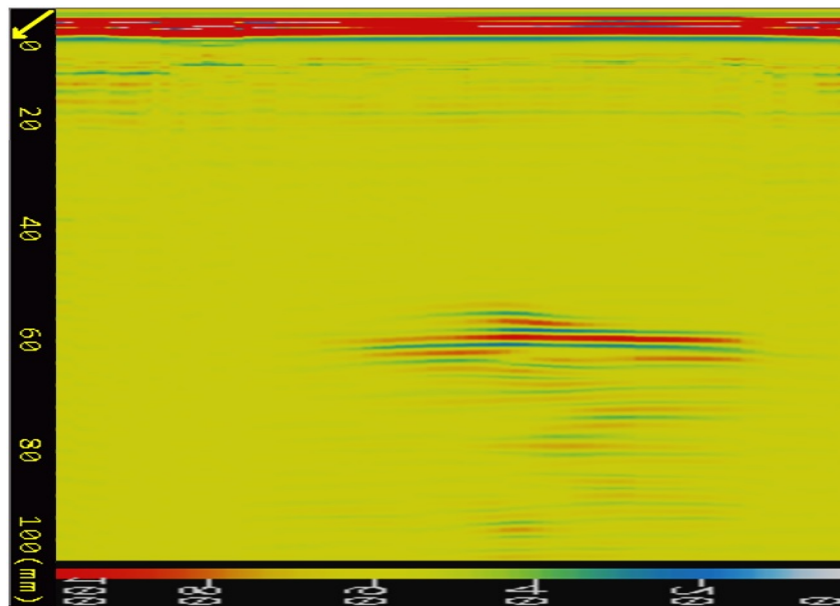


Figura 4.29: B-scan probeta 3 obtenido con equipo comercial.



Figura 4.30: Placa radiográfica de la probeta 3.

Al inspeccionar la probeta 3 por cada una de sus caras laterales, siendo el lado L1 la cara superior y L2, L3 y L4 las sucesivas caras como se observa en la Figura 4.31. Se obtuvieron los resultados que se presentan en las Figuras 4.32, 4.33, 4.34 y 4.35.



Figura 4.31: Probeta 3 L1, L2, L3 y L4.

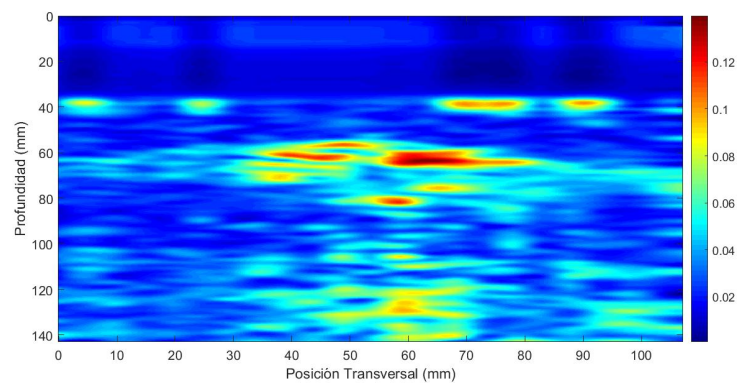


Figura 4.32: B-scan probeta 3 L1.

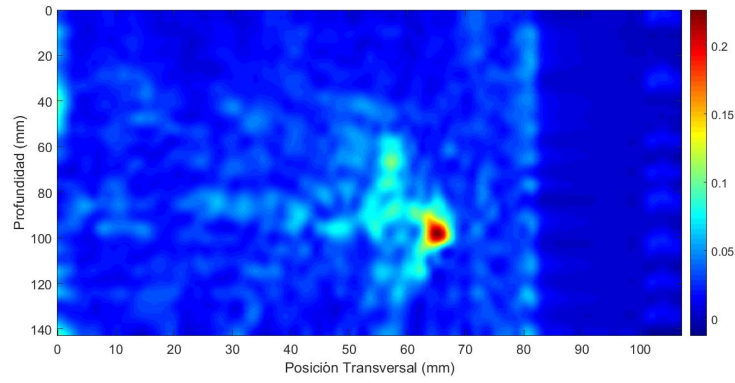


Figura 4.33: B-scan probeta 3 L2.

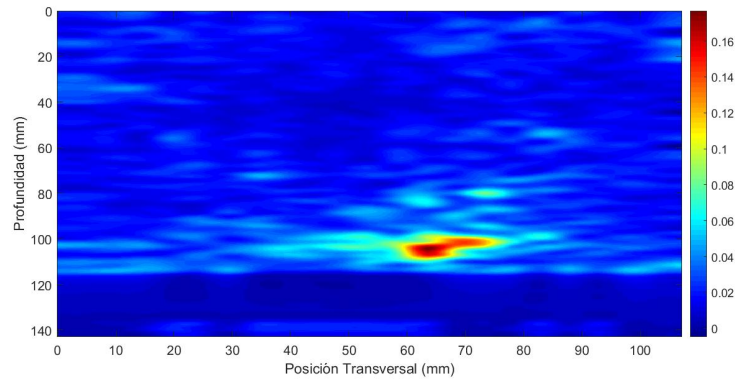


Figura 4.34: B-scan probeta 3 L3.

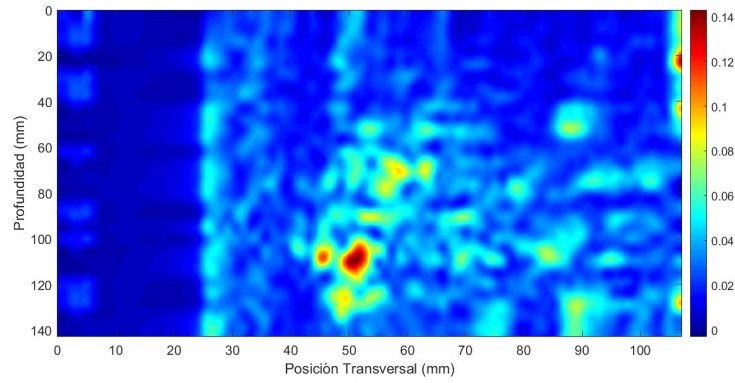


Figura 4.35: B-scan probeta 3 L4.

En base a los resultados anteriores se puede destacar la importancia de inspeccionar un elemento desde sus distintas caras ya que la relación entre la superficie de la discontinuidad y la dirección del haz incidente determinan su detección. En otras palabras podemos estar en presencia de una gran discon-

tinuidad pero si la forma de inspección no es la correcta es posible tener una mala detección.

Finalmente el B-scan 360° obtenido de la probeta 3 a partir de la composición de los 4 anteriores se puede ver en la Figura 4.36.

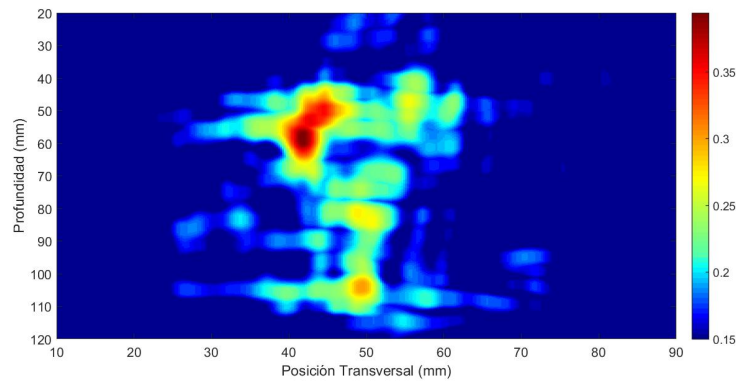


Figura 4.36: B-scan 360° probeta 3.

A partir de analizar y comparar la forma de la discontinuidad revelada en la placa radiográfica y en el B-scan 360° se aprecia una gran concordancia, lo cual se observa en la Figura 4.37.

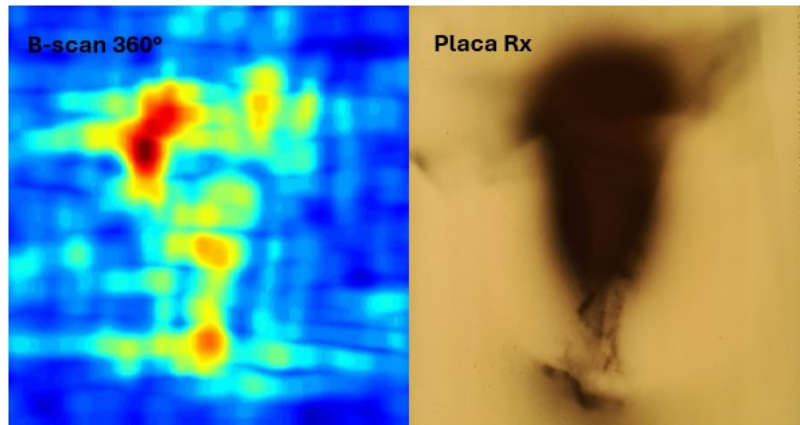


Figura 4.37: Comparación B-scan 360° con placa Rx.

4.4.4. Georradar

A continuación, en la Figura 4.38 se presentan los resultados del análisis de una losa de hormigón y la representación B-scan obtenida luego de ser analizada con el GPR. En la Figura 4.39 se puede observar el resultado de procesar la matriz de datos obtenida con el GPR con el procesamiento planteado en esta tesis, se remarca que la imagen esta invertida por como se obtienen los datos extraídos del GPR.

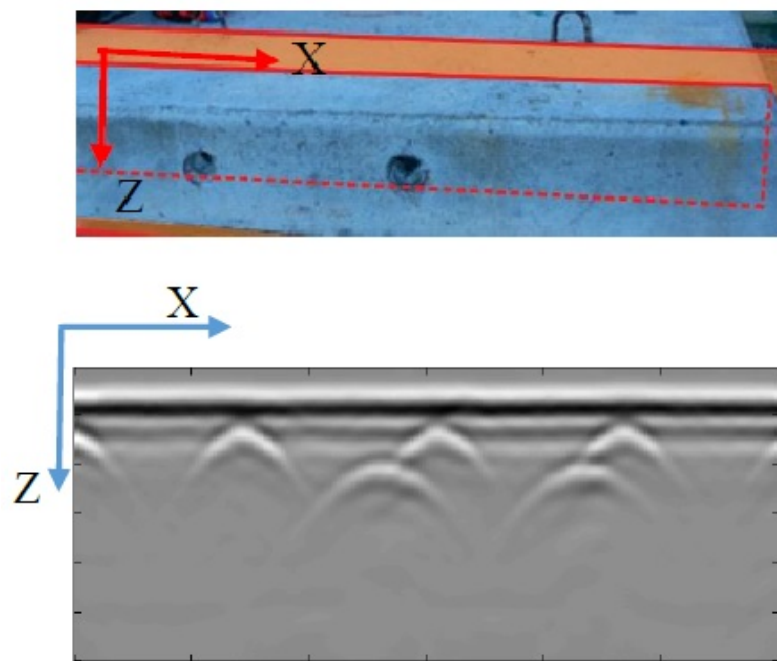


Figura 4.38: B-scan obtenido con el GPR.

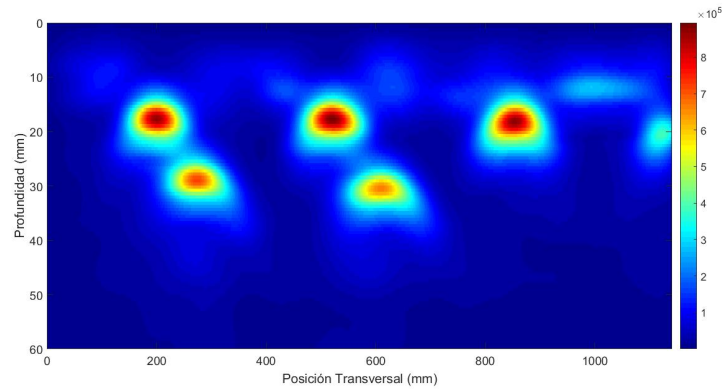


Figura 4.39: B-scan obtenido por procesamiento planteado.

Este último análisis se realizó para evaluar el comportamiento del procesamiento en un área distinta de la ingeniería, con un equipo diferente y con otro tipo de ondas. Los resultados o mejorías obtenidas son del mismo tipo que las alcanzadas al procesar señales ultrasónicas como el los puntos anteriores. Entre ellas se destacan un aumento de la amplitud de los reflectores y la disminución de las hipérbolas, lo cual concentra la representación del reflector en una región más acotada.

Capítulo 5

Consideraciones finales

Se desarrolló una herramienta la cual por medio de procesamiento de señales permite la generación de imágenes B-scan a partir de equipos de medición de espesores por ultrasonido. Se logró el mejoramiento de las señales A-scan adquiridas, para posibilitar su análisis. Se pudo caracterizar el transductor y los aceros utilizados, lo cual es relevante para lograr un correcto procesamiento de las señales. Las imágenes B-scan totalmente procesadas presentaron una reducción en las hipérbolas generadas por los reflectores y un aumento de la amplitud de las indicaciones en la señal A-scan. También se constató un aumento del SNR y CNR lo cual indica un mejoramiento de la calidad de la imagen por medio de la aplicación del procesamiento el cual aplica la suma ponderada de las señales A-scan.

Al comparar los resultados obtenidos de analizar las probetas 1 y 2 con el equipo comercial y el procesamiento desarrollado, una de las principales mejoras es la reducción de las hipérbolas generadas por los reflectores. A su vez en la probeta 2 con el equipo comercial no se logró diferenciar los distintos diámetros de los reflectores, lo cual se hizo apreciable a partir del procesamiento de las señales. Al analizar la probeta con reflectores naturales (probeta 3) por medio de radiografía industrial y por ultrasonidos con la herramienta generada en esta tesis se comprobó que los resultados obtenidos son fiables aún con un muestreo espacial de 5 milímetros. En dicha probeta para finalizar su inspección se realizó un B-scan de 360 ° compuesto a partir de 4 B-scan previos uno por cada cara lateral de la probeta 3, dando como resultado una buena visualización de la discontinuidad la cual se asemeja a la de la placa

radiográfica.

Todo el desarrollo del trabajo se basó en utilizar el transductor en modo de contacto y su posicionamiento siempre es de forma manual con una separación de muestreo espacial de 3 y 5 milímetros. Estas condiciones se asemejan a inspecciones reales en plantas industriales, lo cual le otorga a este trabajo la capacidad de ser robusto y de fácil aplicación. Para el procesamiento desarrollado se tomaron diferentes ideas y conceptos de la técnica SAFT y se aplicaron para el mejoramiento de representaciones B-scan, por lo cual las imágenes obtenidas son B-scan que tienden a una representación SAFT. El procesamiento planteado o secuencia de trabajo es aplicable tanto a señales de ultrasonido y a otros tipos como las del GPR generando resultados que mejoran la calidad de la imagen, ayudando a su correcta interpretación.

El procesamiento de señales permite generar un mejoramiento de la imagen, pero siempre es fundamental seleccionar el transductor más adecuado como por ejemplo en la inspección de la probeta 2 por el lado lejano. Al utilizar un transductor de gran divergencia combinado con hacer inspecciones de gran profundidad no se logran los resultados esperados con el procesamiento desarrollado en esta tesis, por lo cual a medida que se aumenta la profundidad de inspección es aconsejable utilizar transductores más focalizados.

A partir del desarrollo realizado se adquieren herramientas que son aplicables en distintos ámbitos del ultrasonido, no solo en la generación de imágenes, lo cual posibilita un desarrollo a futuro donde se puedan manipular señales y procesarlas con diferentes finalidades por ejemplo la caracterización de materiales.

Referencias bibliográficas

- AEND. (2002). *Partículas magnéticas Nivel 2*. Asociación Española de END.
- AEND. (2009). *Líquidos penetrantes*. Asociación Española de END.
- Águila, M. C., Esquivel, L. S., y González, C. R. (2019). Historia y desarrollo del ultrasonido en la imagenología.
- Almeida, J. G. (2022). Techniques for high-resolution 3D images with Synthetic Aperture Radas. <http://lattes.cnpq.br/0094252806969282>
- ASTM. (1999). Standard Guide for Evaluating Characteristics of Ultrasonic Search Units 1. www.astm.org
- Barkefors, A. (2010). 3D synthetic aperture technique for ultrasonic imaging. <http://www.teknat.uu.se/student>
- Blasina, F. (2019). Procesamiento de señales acústicas aplicado al monitoreo de procesos.
- Busse, L., y Collins, H. (1984). Review and Discussion of the Development of Synthetic Aperture Focusing Technique for Ultrasonic Testing (SAFT-UT).
- Cunat, P. J. (2003). *Manual de aceros inoxidables de euro inox* (Vol. 1).
- Dias, J. C. S., Yusta, C. F., y Romero, M. P. (2011). *Imagen ultrasónica por coherencia de fase*. Universidad Complutense de Madrid, Servicio de publicaciones.
- Doctor, S. R., Hall, T. E., y Reid, L. D. (1986). SAFT-the evolution of a signal processing technology for ultrasonic testing.
- Drinkwater, B. W., y Wilcox, P. D. (2006). Ultrasonic arrays for non-destructive evaluation: a review. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2006.03.006>
- Dwivedi, S. K., Vishwakarma, M., y Soni, A. (2018). Advances and researches on non destructive testing: a review. *Materials Today: Proceedings*, 5, 3690-3698. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.620>

- Gómez, F. R. (1980). *Introducción a los métodos de ensayos no destructivos de control de la calidad de los materiales* (3.^a ed.).
- Gonzalez, N., Valdés, L. M., y Camacho, J. (2016). Composición espacial de imagen ARFI.
- Helal, J., Sofi, M., y Mendis, P. (2015). Non-Destructive testing of concrete: a review of methods. *Special Issue: Electronic Journal of Structural Engineering*.
- Karmakar, M. K., y Kwok, W. H. (2009). *A practice of anesthesia for infants and children* (4.^a ed.).
- Kinsler, L. E., Frey, A., Coppens, A., y Sanders, J. (1988). *Fundamentos de acústica* (1.^a ed.).
- Kroworz, A., y Katunin, A. (2018). Non-destructive testing of structures using optical and other methods: A review. *SDHM Structural Durability and Health Monitoring*, 12, 1-17. <https://doi.org/10.3970/sdhm.2018.012.001>
- León, E. G. D. (2009). *Ultrasonidos Nivel 2*. Asociación Española de END.
- MathWorks. (2024). MATLAB Documentation. <https://www.mathworks.com/>
- Merino, J. A. (2009). Aplicación de la técnica de ultrasonido c-scan con acoplamiento de aire para la inspección de estructuras sandwich de material compuesto.
- Morcillo, G. D. (2011). *Inspección visual Nivel 2 y 3*. Asociación Española de END.
- Müller, S., Niederleithinger, E., Krause, M., y Bohlen, T. (2010). Reverse time migration: a seismic imaging technique applied to ultrasonic data. www.ndt.net/?id=9953
- Padín, G. A. C. (2007). Estudio de un sistema de generación de imágenes acústicas aplicable a supervisión submarina de las conchas de abanico.
- Parrilla, R. M. (2004). Conformación de haces ultrasónicos mediante muestreo selectivo con codificación delta.
- Quirós, D. P., Brizuela, J., y Desimone, C. (2017). Composición de imágenes ultrasónicas de alta resolución empleando sistemas de phased array para la inspección de componentes de uso nuclear.
- Schickert, M., Krause, M., y Ller, W. M. (2003). Ultrasonic Imaging of Concrete Elements Using Reconstruction by Synthetic Aperture Focusing Technique. <https://doi.org/10.1061/ASCE0899-1561200315:3235>
- Seeber, A., Vrana, J., Mooshofer, H., y Goldammer, M. (2018). Correct sizing of reflectors smaller than one wavelength. <http://www.ndt.net/?id=22762>

- SEF, AEND, CNDT, CrSNDT, MAROVISZ y RELACRE. (2013). *Radiografía Nivel 1 y 2*.
- Shen, G. (2006). Review of non-destructive testing in china.
- Skjelvareid, M. H. (2012). Synthetic aperture ultrasound imaging with application to interior pipe inspection.
- Soriano, M. C., y Pastor, R. R. (2016). *Termografía infrarroja*. Asociación Española de END.
- Spies, M., Rieder, H., Dillhöfer, A., Schmitz, V., y Müller, W. (2012). Synthetic aperture focusing and time-of-flight diffraction ultrasonic imaging - past and present. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 31, 310-323. <https://doi.org/10.1007/s10921-012-0150-z>
- Stepinski, T. (2007a). Synthetic aperture focusing technique in ultrasonic inspection of coarse grained materials.
- Stepinski, T. (2007b). An implementation of synthetic aperture focusing technique in fequency domain. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 54, 1399-1408. <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2007.400>
- Veca, A. C., y Accolti, E. (2016). Ultrasonido para ingenieros y estudiantes de ingeniería.