

UNIVERSIDAD NACIONAL DE GENERAL SAN MARTÍN
COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA
INSTITUTO DE TECNOLOGÍA
“Prof. Jorge A. Sabato”

Composición de imágenes ultrasónicas de alta resolución
empleando sistemas de Phased Array para la inspección de
componentes de uso nuclear ^(*)

por Ing. Dante Patricio Quirós

Director

Dr. Jose Brizuela
Ing. Carlos Desimone

^(*) Tesis para optar al título de *Magister en Ciencia y Tecnología de Materiales*

República Argentina

2017

Listado de participaciones en congresos y revistas

- D. Quirós, J Brizuela, C. Desimone, S Daneri. “Composición de imágenes ultrasónicas de alta resolución empleando sistemas de Phased Array para la inspección de componentes de uso nuclear”, *16° Congreso Internacional de Metalurgia y Materiales SAM-CONAMET 2016*, Córdoba, Argentina, 2016.
- D. Quirós, J Brizuela, C. Desimone, S Daneri. “Composición de imágenes ultrasónicas de alta resolución empleando sistemas de Phased Array para la inspección de componentes de uso nuclear”. En revisión por la editorial de la *Revista Matéria*, Rio de Janeiro, Brasil (2017).

Proyectos científicos tecnológicos en los que participó este trabajo de tesis de maestría

- Este trabajo fue realizado con una beca de Maestría de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) y desarrollada entre el Instituto Sábato (CNEA-UNSaM) y el Centro Atómico Constituyentes.
- Parte de este trabajo se ha enmarcado en el proyecto de investigación PICT-2014-1768 “Inspección volumétrica de componentes nucleares realizados con materiales con estructura granular gruesa”, financiado por la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica.
Investigador responsable: Brizuela, Jose David.
Institución Beneficiaria: Comisión Nacional de Energía Atómica.
Total subsidio: \$ 849.088.

Dedicatoria

*A mi madre por darme más que la vida,
a mi viejo que ya no está pero me acompaña,
a mis hermanos porque ellos me hicieron así
con su cariño infinito y su ayuda invaluable,
a Noelia y mis amigos por el aguante de siempre.*

Agradecimientos

En primer lugar agradezco a mis padres. A mi madre que con su amor insuperable me forjó como persona, todo lo bueno que hay en mí y todo lo que podré ser sin dudas se lo debo a ella, madre mejor no se puede pedir. A mi padre por ser un ejemplo, por amarme, por inspirarme a estudiar Ingeniería, lo que he logrado hasta aquí fue para que en algún lado puedas sentirte orgulloso de tu hijo.

A mis hermanos. A Belén por su enorme cariño, por su apoyo y por sus incontables gestos de generosidad. A Rodrigo por ser mi segundo padre y mi primer amigo, por estar cerca aunque estés lejos. A Verónica por cuidarme, por darme afecto y un millón de manos de ayuda, siempre.

A mi cuñado Federico, a mis sobrinos Santiago, Felipe y Lucía, porque ellos también son mi familia y los adoro como tales.

A mi director Jose, por su ayuda continua, por su paciencia, por sus vastos conocimientos y las capacidades docentes de saber transmitirlos. A mi codirector “Carlitos”, por sus grandes gestos de apoyo y por sus sabias palabras. Ellos fueron una guía académica y humana continua a lo largo de este trabajo.

A mis amigos Enzo, Belén, Guillermo, Magalí, Edgar, Daiana y Silvana por el apoyo, las risas, las historias; y todo eso que significó que nuestro tiempo de maestrando sea más agradable y mucho más apasionante. Sin dudas que nunca olvidaremos de lo que vivimos.

A mis amigos de Tucumán: Fernando, Gabriel, Gus, Ezequiel, Diego, Fernanda, Zack, Pablo, Gonzalo, Alejo, Pato, Isidro y Franco.

A Noelia por su amor incondicional y por ser la sonrisa que tienen todos mis días.

Índice de contenido

Índice de figuras	6
Índice de tablas	9
Lista de símbolos y acrónimos	9
Resumen	12
Abstract	13
1. Introducción	14
1.1 Ensayos No Destructivos (END)	14
1.2 Ultrasonido como técnica de END	16
1.2.1 Definición y clasificación.....	16
1.2.2 Propagación de las Ondas Ultrasónicas: propiedades y consideraciones.	17
1.2.3 Phased Array	23
1.2.3.1 Reseña histórica del PA.....	24
1.2.3.2 Principios de la formación de imágenes por PA	26
1.2.3.3 Imágenes de Phased Array	32
1.2.3.4 Problemas y limitaciones del PA	35
2. Método propuesto	39
2.1 Hipótesis	39
2.2 Bases y precedentes	39
2.3 Composición de imágenes con alta resolución	45
2.3.1 Adquisición de imágenes de PA.....	46
2.3.2 Interpolación Bilineal	48
2.3.2.1 Interpolación bilineal sin interfaz.....	49
2.3.2.2 Interpolación bilineal con interfaz.....	50
2.3.3 Creación del cubo de datos.....	58
2.3.4 Suma coherente de las imágenes con diversidad espacial.....	59
2.3.5 Búsqueda del método de combinación.....	61
2.3.6 Número óptimo de imágenes.....	62
3. Resultados	64
3.1 Adquisición de imágenes de PA	64

3.2	Ensayos sin interfaz	65
3.2.1	Reflectores en inmersión	65
3.2.2	Ensayo por contacto	73
3.3	Ensayo con interfaz.....	75
3.3.1	Interfaz de agua (composición con traslación).....	75
3.3.2	Zapata polimérica (composición con traslación y giro).....	79
3.4	Composición por reflexión especular	84
3.5	Diagrama de flujo del algoritmo final obtenido.....	91
4.	Conclusiones	92
5.	Anexo	94
5.1	Descripción de las técnicas END	94
5.2	Clasificación de los END según principio físico	97
5.3	Clasificación de los END según rango de alcance.....	97
5.4	Velocidades de propagación para diferentes materiales.	98
5.5	Valores de la impedancia acústica en distintos materiales.	99
6.	Referencias	100

Índice de figuras

Figura 1. Refracción en interfaz.	20
Figura 2. Refracción y conversión de modo.	21
Figura 3. Array emitiendo un frente de onda combinado de característica plana.	26
Figura 4. Deflexión y focalización de haz emitido por un array.	27
Figura 5 Cálculo de las leyes focales en emisión para la posición del foco (R_f, θ_f).	29
Figura 6. Conformación del haz en recepción para el reflector (o foco F).	30
Figura 7. A-Scan en radiofrecuencia y en envolvente de un reflector ubicado a 15 mm de profundidad. Se aprecian de izquierda a derecha, el pulso de entrada, la señal del reflector y el eco de fondo de la pieza.	33
Figura 8. Imagen B-Scan de cinco reflectores en formato lineal (Izquierda) . Barrido lineal con un ángulo de deflexión de -20° (Derecha).	34
Figura 9 Imagen S-Scan o sectorial de cinco reflectores y fondo de pieza irregular.	35
Figura 10. Shattuck y Von Ramm (1982). Diagrama del sistema para el escáner propuesto.	40
Figura 11. Berson et al. (1981). Escaneo compuesto de barridos lineales con diferentes ángulos.	41
Figura 12. Jespersen et al. (1998). (a) Imagen compuesta y (b) convencional de una aorta torácica explorada en agua desmineralizada a 43 mm de profundidad.	42
Figura 13. Robinson y Knight (1981). Imagen de la reconstrucción de datos tomados del objeto de prueba AIUM de 100 mm según la reconstrucción por a) detección de pico, b) mínimo, c) integración y d) promediado.	43
Figura 14. Esquema propuesto para la composición de imágenes ultrasónicas.	46
Figura 15. Estructura matricial de una imagen de PA.	47
Figura 16. Interpolación bilineal para un barrido angular sin interfaz.	49
Figura 17. Refracción de las líneas A-Scan empleando el método de trazado de rayos.	51
Figura 18. Grilla de pixeles para un barrido con interfaz	53
Figura 19. Grilla de pixeles y cuadrilátero formado por las líneas de barrido.	54
Figura 20. Ubicación del pixel M en la zona a representar.	56
Figura 21. Ponderación de muestras para la interpolación bilineal con barrido angular e interfaz.	57
Figura 22. Matriz tridimensional de pixeles (cubo de datos).	59
Figura 23. Diversidad espacial obtenida de “q” barridos.	59

Figura 24 Grilla ampliada y nivel de superposición para una composición de 10 imágenes S-Scan	60
Figura 25. Patrones laterales obtenidos de un reflector puntual empleando distintos métodos de combinación.	62
Figura 26. Esquema del ensayo de búsqueda del número óptimo de imágenes.	63
Figura 27. Efecto de la separación entre imágenes y el número de tomas B-Scan de la composición en la respuesta que se obtienen de 5 reflectores.	63
Figura 28. Sistema SITAU (izquierda) y transductor de Phased Array (derecha).	64
Figura 29. Arreglo para obtener reflectores esféricos a diferentes profundidades.	66
Figura 30. Transductor y probeta en condiciones de inmersión dentro de la cuba de agua desgasificada.	66
Figura 31. Imagen S-Scan con un barrido entre $\pm 45^\circ$ con una apertura activa de 32 elementos.....	67
Figura 32. Imágenes S-Scan obtenidas al desplazar la posición de la apertura en 4.5 mm hacia la derecha.	68
Figura 33. Imagen compuesta por la suma coherente de las 10 imágenes capturadas cada 4.5 mm. Cada imagen individual (limitada con líneas verdes) aporta información parcial de la imagen de salida.	69
Figura 34. Detalle de la comparación de los reflectores puntuales en la imagen PA mostrada en la Figura 30, con la imagen compuesta por 10 B-Scans.....	69
Figura 35. Imagen compuesta por la suma coherente de las 10 imágenes capturadas cada 4.5 mm expresada con un rango dinámico de 25dB.....	70
Figura 36. Comparación de patrones laterales obtenidos para un mismo reflector empleando la información de la imagen original y compuesta. La escala de amplitud está expresa en valores normalizados.	71
Figura 37. Comparación de perfil lateral del reflector central para la imagen original y la composición, en valores porcentuales relativos al pico.	72
Figura 38. Fisura de fatiga estudiada, ampliada en un microscopio óptico.....	73
Figura 39. Esquema del ensayo de la fisura de fatiga.....	73
Figura 40. Imagen de la fisura de fatiga lograda con un barrido angular de $\pm 45^\circ$	74
Figura 41. Imagen compuesta por 10 barridos S-Scans de la fisura de fatiga.....	75
Figura 42. Probeta tubular de acero inoxidable austenítico.....	76
Figura 43. Esquema del ensayo de la probeta tubular en inmersión.....	77
Figura 44. Imagen resultante de la composición coherente de 9 imágenes B-Scans con haz normal de la pieza tubular.	78

Figura 45. Comparación de reflectores centrales con superposición de imágenes y sin superposición.	78
Figura 46. Montaje realizado para adaptar la zapata al transductor.	79
Figura 47. Esquema del ensayo de calibración de composición con traslación y giro del transductor.....	80
Figura 48. Imagen resultante de la composición coherente (con traslación y giro) de 7 S-Scans, utilizada para verificar la propuesta.....	80
Figura 49. Montaje de array y cuña sobre el “Test Block Type B” y región de interés.	81
Figura 50. Imágenes S-Scan tomadas desde distintos puntos y con distinta orientación, de los taladros seleccionados para la experimentación dentro del “Test Block Type B”.....	82
Figura 51. Esquema del ensayo sobre la probeta “Test Block Type B”.	83
Figura 52. Imagen compuesta del “Test Block Type B” a partir de la captura de 3 barridos S-Scans con orientación izquierda-derecha y de 7 imágenes S-Scans con orientación derecha-izquierda.	83
Figura 53. Detalle de la zona de los reflectores cercanos a la superficie adquiridos con un barrido de orientación izquierda-derecha (izquierda), imagen de los reflectores en la región central vistos por un barrido de orientación derecha - izquierda (centro), y detalle de todos los reflectores contenidos en la imagen compuesta.	84
Figura 54. Esquema de una señal especular de un defecto.	85
Figura 55. Esquema de una composición con reflexión especular.	86
Figura 56. Probeta de acero inoxidable austenítico con un cordón de soldadura y entallas de referencia.....	86
Figura 57. Imagen S-Scan del cordón de soldadura de acero inoxidable austenítico.....	87
Figura 58. Composición con reflexión especular de 4 B-Scans de la probeta de acero inoxidable austenítico soldada.	88
Figura 59. Distancias entre los puntos de intersección de distintas líneas de barrido y un defecto no puntual.....	89
Figura 60. Comparación de una fotografía y las imágenes por composición por reflexión especular en escala normalizada y en decibeles.	90

Índice de tablas

Tabla 1. Clasificación de zonas de ultrasonido por frecuencia y aplicaciones.	16
Tabla 2. Clasificación de los END por principio físico.	96
Tabla 3. Clasificación de los END zona de evaluación – posición del defecto.	96
Tabla 4. Velocidades longitudinales y transversales para distintos materiales.	97
Tabla 5. Impedancia acústica de distintos materiales.	98

Lista de símbolos y acrónimos

α : ángulo que forma la dirección de propagación del sonido con la normal a la interfaz.

α_{cI} : primer ángulo crítico de incidencia.

α_{cII} : segundo ángulo crítico de incidencia.

β : ángulo complementario de α .

θ : ángulo de barrido.

λ : longitud de onda.

μ : módulo de Poisson.

τ_i^E : retardo en emisión del elemento i .

τ_i^R : retardo en recepción del elemento i .

ω : frecuencia angular.

a : pendiente de una recta sobre la grilla de pixeles

A : amplitud de la señal

A_N : amplitud de la señal normalizada.

A_{db} : amplitud de la señal en decibeles.

A-Scan: señal cuya amplitud representa la reflectividad del medio en la dirección de propagación del haz ultrasónico.

- b : ordenada al origen de una recta sobre la grilla de pixeles.
- b_{sc} : archivo con los parámetros del ensayo.
- B-Scan: imagen bidimensional formada por varios A-Scan.
- c_l : velocidad de propagación longitudinal.
- c_t : velocidad de propagación transversal.
- dR : distancia de separación entre muestras sucesivas de un A-Scan.
- E : módulo de Young.
- E_c : energía cinética por unidad de volumen.
- E_R : porcentaje de energía reflejada.
- END: Ensayos No Destructivos.
- f : frecuencia.
- $f_{sampling}$: frecuencia de muestreo
- F : foco.
- FPS: imágenes por segundo (del inglés “Frame Per Second”)
- G : módulo de corte.
- h : coordenada horizontal de la grilla de pixeles.
- $hmax_q$: ancho de la grilla de pixeles correspondiente a la imagen q
- $hmax_t$: ancho de la grilla ampliada de pixeles de la imagen compuesta
- $H(\theta)$: función de directividad del array.
- img : matriz imagen con los valores de cada muestra de cada línea de la imagen B-Scan.
- k : número de onda.
- K_N : factor de aumento de intensidad del foco.
- l_{array} : longitud del array.
- m_t : cantidad totales de muestras de una traza A-Scan.
- $M(i, j)$: intensidad del pixel de ubicado en la posición (i, j) en la matriz de interpolación M.
- n_t : cantidad total de trazas A-Scan que contiene un barrido.
- N : número de elementos transductores que contiene el array y que forman la apertura total.
- N_a : número de elementos empleados en la apertura activa.
- p : presión acústica.

$pitch$: distancia entre los centros de dos elementos adyacentes del array.

$P(m, n)$: factor de peso de la muestra m de la línea n .

PA: phased array.

PHWR: reactor de agua pesada presurizada (del inglés: “Pressurized Heavy Water Reactor”).

q_t : número de imágenes B-Scan a componer.

$u_i(t)$: señal recibida por el elemento número i .

r : radio.

R_f : distancia desde el punto medio de la apertura de emisión al foco

R_i : distancia desde el elemento i del array al foco.

R_W : distancia del array al frente de onda.

RF : radiofrecuencia de un A-Scan.

$s_i(t)$: señal del elemento i luego de ser compensada en el tiempo con el retardo focal.

st : separación entre dos barridos sucesivos.

$S(t)$: señal conformada de A-Scan en el tiempo.

$S(m, n)$: valor de la señal para la muestra m de la línea n , en un barrido sin interfaz.

SNR: relación señal ruido (del inglés “Signal to Noise Ratio”)

S-Scan: imagen B-Scan obtenida de un barrido sectorial.

t_i^E : tiempo de vuelo en emisión del elemento i .

t_i^R : tiempo de vuelo en recepción del elemento i .

v : coordenada vertical de la grilla de pixeles.

$vmax_q$: alto de la grilla de pixeles correspondiente a la imagen q

$vmax_t$: alto de la grilla ampliada de pixeles de la imagen compuesta

VID: envolvente de A-Scan obtenida mediante la transformada de Hilbert.

W_{BScan} : ancho de una imagen B-Scan de haz normal.

x : coordenada horizontal de la imagen B-Scan capturada por el equipo

z : coordenada vertical de la imagen B-Scan capturada por el equipo.

Resumen

Dentro del ámbito de los Ensayos No Destructivos (END) y, en particular, en el campo de los diagnósticos por Ultrasonidos (US), la técnica de Phased Array (PA) se ha convertido en una herramienta de evaluación por imágenes muy utilizada en el sector industrial, por ejemplo, para la inspección periódica de componentes críticos de una instalación.

La técnica PA permite realizar deflexiones con el haz de ultrasonidos y, enfocarlo a diferentes profundidades dentro del material mediante el control electrónico de cada uno de los N elementos que componen el transductor o array. Esta capacidad facilita la realización de diversos barridos y generar imágenes en distintos formatos (Modo B o S).

Las imágenes de PA resultan muy eficientes en la detección de los defectos, siempre que éstos tengan una orientación favorable a la dirección del haz. Por lo tanto, es requisito establecer correctamente el posicionamiento del transductor y la configuración del barrido. No obstante, existen inconvenientes adicionales, tales como, las pérdidas de calidad e intensidad en las indicaciones a medida que la detección se realice con ángulos grandes. En estos casos, es conveniente compensar las amplitudes de las señales y realizar exploraciones desde distintas posiciones y con diferentes rangos angulares para obtener una mayor diversidad de información.

Este trabajo presenta la composición espacial y coherente de imágenes PA capturadas con distintas orientaciones y posiciones sobre un mismo plano de la pieza, para luego ser combinadas en una única imagen. Cada una de las imágenes primarias individuales aporta una información espacial específica que depende de las características de emisión, por lo que la imagen formada por la combinación de toda la información, tendrá una mayor calidad en la que se incrementa la capacidad de detección de defectos.

La propuesta consiste en la creación de un algoritmo genérico capaz de realizar una conversión de barrido utilizando la interpolación bilineal de los datos adquiridos, facilitando el análisis cualitativo y cuantitativo de las indicaciones. El desarrollo ha sido validado en materiales y componentes de uso nuclear.

Palabras clave: Ensayos No Destructivos, Ultrasonido, Phased Array, Composición de Imágenes.

Abstract

The Phased Array Ultrasonic Technique (PAUT) has become in a widely used imaging tool for the Nondestructive Testing (NDT) in the industrial field, for example, for the periodic inspection of critical components of an installation.

The PAUT allows steering and focusing the ultrasound beam at different depths within the material, through an electronic control of each of the N elements that make up the array transducer. Thus, several electronic sweeps can be performed for obtaining images in different formats (B or S scans).

The PAUT imaging is very efficient for detecting flaws whenever they have a favorable orientation to the beam direction. Therefore, it is necessary to establish the transducer position and setting the scanning correctly. Nevertheless, there are some drawbacks such as quality and intensity losses on the indications when the detection is made at high angles. For these reasons, it is necessary to perform amplitudes corrections and to explore from different positions using different angular ranges to obtain information with spatial diversity.

This work presents the spatial and coherent compounding of PAUT images, which have been captured with different orientations and positions on the same plane of the piece, to be combined in a single image. Each of the individual primary images provides specific spatial information that depends on the emission characteristics, so that the combination of multiple images allows all the information to be presented in a higher quality image in which the defect detection capacity is increased.

A generic algorithm was developed for performing a scanning conversion using the bilinear interpolation, which allows obtaining a high quality final image and more accuracy in the quantitative analysis of indications. The proposal has been validated on materials and components of nuclear applications.

Keywords: Nondestructive Testing, Ultrasonic, Phased Array, Image Compounding.

1. Introducción

1.1 Ensayos No Destructivos (END)

Los Ensayos No Destructivos (END) se refieren a una serie de técnicas que tienen como objetivo evaluar y determinar el estado de los materiales o componentes sin afectar a las propiedades físicas, químicas, mecánicas, y dimensionales [1]. Es decir que los END, permiten detectar, localizar, evaluar discontinuidades y establecer defectos en los materiales o estructuras sin afectar en modo alguno su funcionalidad o vida útil [2].

Los defectos pueden estar intrínsecamente presentes como resultado del proceso de fabricación o también pueden ser la consecuencia de exigencias, tales como esfuerzos, temperatura, corrosión, etc., a las que se puede someter un material o un componente durante su vida en servicio. En consecuencia, resulta de particular interés para la industria (en especial durante los procesos de inspección en servicio, control de calidad y análisis de fallas) encontrar técnicas para evaluar los defectos antes de que alcancen un tamaño crítico.

Uno de los aspectos fundamentales en lo que refiere a los procesos de END, es la persona que lo realiza y las responsabilidades que conlleva su análisis. Por lo tanto, están obligados a cumplir con extensos programas de formación y con requisitos de larga experiencia previa para ser certificados [3]. Sin embargo, muchas veces, el personal técnico de END está sometido a ambientes y condiciones de trabajo desfavorables. Es por ello que cada vez se tiende a la automatización de la aplicación y de la evaluación de los END.

Por otro lado, para asegurar la correcta realización de los END se deben emplear patrones de calibración y estándares de referencia para contrastar con los resultados que se obtienen. Entre las principales normas y códigos de fabricación se destacan las publicadas por ASME, ASTM, AWS y API.

Dentro del ámbito de los procesos industriales los END son aplicados con el fin de:

- Examinar las materias primas antes de su procesamiento.
- Evaluar los materiales durante su procesamiento como medio de control.
- Examinar los productos terminados.
- Evaluar los productos y estructuras una vez puestos en servicio.

Durante el proceso de manufactura, las inspecciones se llevan a cabo para evaluar si las piezas (o producto) están siendo elaboradas según el cumplimiento de las normas o especificaciones que acrediten la calidad exigida. Por otro lado, cuando una pieza está en servicio, las inspecciones se deben realizar de forma periódica para determinar si en las condiciones actuales de operación puede usarse de forma segura entre inspecciones consecutivas. Estas exploraciones son importantes para conocer, con tiempo suficiente, las modificaciones que pueden sufrir los defectos identificados, así como planificar las acciones de mantenimiento seguro y efectivo.

Existe una gran cantidad y variedad de técnicas de END enfocadas a examinar diferentes materiales y para determinar la presencia, localización y tamaño de las discontinuidades que pueden perjudicar la operatividad de piezas (nuevas o en servicio). Entre las técnicas más comunes se encuentran: la inspección visual (IV), la radiografía industrial (RI), los líquidos penetrantes (LP), las partículas magnéticas (PM), las pruebas ultrasónicas (US), y las corrientes inducidas (CI). También existen técnicas más especializadas, como son las emisiones acústicas (EA) y la termografía infrarroja (TI), entre otras más. Una breve descripción los métodos de END más utilizados, destacando el área de aplicación, ventajas y limitaciones se encuentra en el Anexo.

Cada método de END tiene su campo de aplicación y también sus limitaciones. Por tanto, resulta común el uso de dos o más técnicas distintas durante un proceso de inspección, especialmente cuando es necesario conocer la condición de la pieza a estudiar tanto internamente como superficialmente.

De acuerdo con el tipo de análisis que se puede realizar al aplicar las técnicas de END, se puede realizar una clasificación en tres áreas [4]:

- 1- **Defectología:** se busca la detección de defectos, heterogeneidades, discontinuidades, fisuras, etc.
- 2- **Caracterización de materiales:** se determinan las propiedades físicas (conductividad eléctrica, permeabilidad magnética, etc.), químicas (caracterización química, detección de problemas de corrosión, etc.), y mecánicas (dureza, etc.) del material.
- 3- **Metrología:** el objetivo es el control dimensional de las piezas y sus recubrimientos.

También, las técnicas END se pueden clasificar de manera más específica, ya sea según el fenómeno físico en el que se basan (Anexo: **Tabla 2**) o según la región de alcance que permiten evaluar (**Tabla 3**).

1.2 Ultrasonido como técnica de END

1.2.1 Definición y clasificación

Los ultrasonidos son ondas acústicas, es decir, perturbaciones elásticas (o mecánicas), que se propagan por todos los medios materiales mediante el movimiento armónico de sus moléculas [5]. Su nombre deviene de su frecuencia de oscilación que está por encima de la frecuencia de las ondas audibles, esto es, frecuencias superiores a 20kHz [6]. El límite superior no está establecido ya que depende de la tecnología de fabricación de los transductores. En este contexto, actualmente se está trabajando con frecuencias superiores a los 100 MHz (microscopía ultrasónica) [7].

Existen numerosas aplicaciones que utilizan las vibraciones ultrasónicas en medios sólidos, líquidos o gaseosos en diversas disciplinas científicas entre las que destacan aplicaciones médicas (equipos de terapia ultrasónica, sistemas Doppler para la medición del flujo sanguíneo [8] y estructuras en movimiento, sistemas ecográficos, nebulizadores para asmáticos, cirugía, odontología, etc.), en biología, en comunicaciones, etc.

También se utilizan en aplicaciones industriales como en procesos de limpieza y depuración (limpiadores ultrasónicos), sistemas de soldadura para plásticos, medición de nivel y de flujo, procesos de colada y solidificación, mecanizados, ensayos y medidas de laboratorio, etc.

El espectro acústico se clasifica en tres intervalos de frecuencia, dentro de los cuales se encuentran las aplicaciones mencionadas anteriormente, tal como se resume en la Tabla 1.

Frecuencia	Rango	Aplicaciones
20 - 1000 kHz	Baja frecuencia	Sistemas de limpieza, agitación y cavitación. Terapia médica.
1 – 25 MHz	Alta frecuencia	Ensayos no destructivos. Diagnóstico médico.
>100 MHz	Muy alta frecuencia	Microscopía acústica

Tabla 1. Clasificación de zonas de ultrasonido por frecuencia y aplicaciones.

1.2.2 Propagación de las Ondas Ultrasónicas: propiedades y consideraciones.

Los ultrasonidos, como cualquier otra onda mecánica, no pueden propagarse a través del vacío, sino únicamente a través de medios materiales, elásticos y continuos, generan una variación local de presión o densidad, que se transmite en forma de onda esférica periódica o *cuasiperiódica*. La propagación de las ondas conlleva una serie de propiedades asociadas al medio, como ser la velocidad y la atenuación, la densidad y las propiedades elásticas.

Además, al tratarse de un fenómeno ondulatorio las ondas ultrasónicas poseen una serie de características comunes con el resto de las ondas, y otras características específicas que dependerán de las propiedades del medio.

➤ **Velocidad**

El sonido viaja a diferentes velocidades a través de distintos materiales. Existen dos factores principales que afectan la velocidad del sonido: la densidad y la elasticidad del material (definida por el módulo de Young E para ondas longitudinales y por el módulo de corte G para ondas transversales), además guarda una cierta dependencia con el módulo de Poisson [9], [10]. La fórmula de la velocidad del sonido para ondas longitudinales en un material isotrópico es:

$$c_l = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{(1 - \mu)}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}} \quad (1.1)$$

Donde

c_l : velocidad de la onda longitudinal.

E : módulo de Young.

ρ : densidad.

μ : módulo de Poisson.

Mientras que para las ondas transversales se tiene:

$$c_t = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1 + \mu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (1.2)$$

En donde:

c_t : velocidad de la onda transversal

G: módulo de corte.

➤ **Longitud de onda**

Mientras cada partícula de material completa su ciclo de vibración, el sonido viajará una cierta distancia dependiendo de la velocidad del mismo en ese material. Se denomina longitud de onda a la distancia que para un material dado y a una determinada frecuencia se calcula de la siguiente manera:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1.3)$$

Donde

λ : longitud de onda

c : velocidad de la onda (transversal o longitudinal)

f : frecuencia

➤ **Reflexión**

Cuando una onda de ultrasonido se encuentra con una interfaz (es decir con el límite entre un medio y otro, ya sea de distintos estados o de diferentes materiales) una parte del sonido será transmitido hacia el segundo medio mientras que el resto será reflejado y devuelto al primer medio. Las proporciones que se reflejarán o transmitirán dependen de las propiedades de los materiales que forman la interfaz. Cada material tiene asociado un factor que se utiliza para calcular la reflectividad en una interfaz [1]. Este factor se denomina "impedancia acústica" (Z) y se define como el producto de la densidad (ρ) y velocidad de propagación (c) para ese material. Dicho matemáticamente:

$$Z = \rho \times c \quad (1.4)$$

Además, se puede calcular el porcentaje de la energía reflejada (E_R) en una interfaz correspondiente a dos materiales caracterizados por sus impedancias acústicas Z_1 y Z_2 de la siguiente forma:

$$E_R = \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2 \times 100\% \quad (1.5)$$

De (1.5) se puede saber que la energía reflejada para una interfaz acero a agua es del 88%, mientras que para una interfaz acero a aire es casi del 100%.

➤ **Acoplante**

El fenómeno de la reflexión también puede ser un problema si entre el transductor y la superficie de la pieza no existe un contacto perfecto, ya que en la parte donde existe un espacio entre ambos resultará perjudicial por pequeño que sea. La razón de ello es que allí se produce una interfaz sólido-aire, la cual tiene casi un 100% de reflexión, por lo que el sonido vuelve directamente hacia el transductor sin ser transferido a la pieza. Para solucionar este problema se utiliza un material de “acople” que permite excluir el aire en la zona de contacto y que además adapta las impedancias acústicas. Los acoplantes más utilizados en la industria son agua, aceite y geles especiales diseñados para éste propósito [11].

➤ **Energía e intensidad acústica**

La propagación de una onda se caracteriza por el transporte de energía y no de masa. Partiendo de la definición de energía cinética y al reemplazar la masa por la densidad para obtener la energía por unidad de volumen [5], se llega a:

$$E_c = \frac{1}{2} \frac{p^2}{Zc} = \frac{1}{2} \frac{p^2}{\rho c^2} \quad (1.6)$$

Donde:

E_c : energía por unidad de volumen

p : presión máxima de la onda

Z : impedancia acústica

c : velocidad de la onda

ρ : densidad del material

Por otra parte, la intensidad acústica (I) se define como la potencia transferida por una onda por unidad de área normal a la dirección de propagación. La misma tiene unidades de W/m^2 y se define como:

$$I = \frac{1}{2} \frac{p^2}{Z} = \frac{1}{2} \frac{p^2}{\rho c^2} \quad (1.7)$$

➤ Refracción

Cuando un frente de onda incide sobre una interfaz existe una parte de la energía que se transmite y otra que se refleja. Para el caso de un frente de onda plano que incide desde un medio (Z_1) sobre la frontera con otro medio (Z_2) con un ángulo α_1 , ocurre que la onda reflejada tiene la misma longitud de onda que la onda incidente por propagarse en el mismo medio, por lo tanto, el ángulo de reflexión es el mismo que el de incidencia, respecto a la normal de la interfaz. Sin embargo, la onda transmitida, al propagarse en un medio con una velocidad diferente sufre el fenómeno de refracción, variando su ángulo de propagación (**Figura 1**).

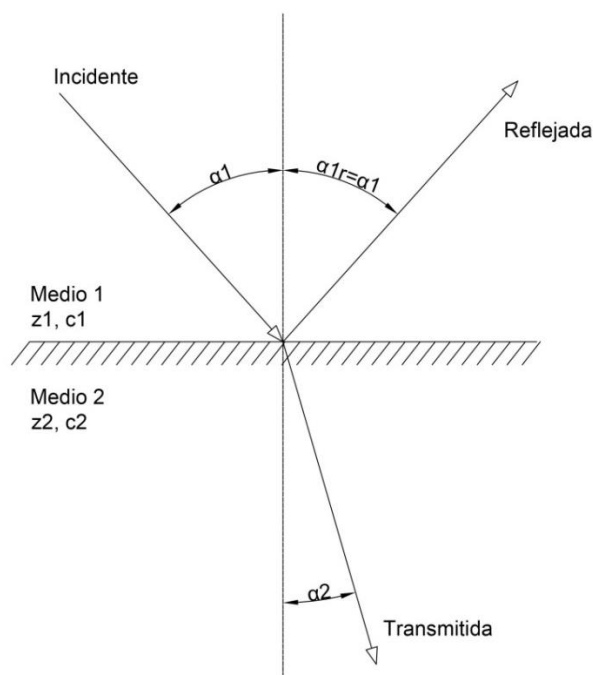


Figura 1. Refracción en interfaz.

El fenómeno de refracción por cambio de velocidad de la onda se encuentra descrito matemáticamente mediante la ley de Snell:

$$\frac{\text{sen } \alpha_1}{\text{sen } \alpha_2} = \frac{c_1}{c_2} \quad (1.8)$$

➤ **Conversión de modo y ángulos críticos**

Este fenómeno se presenta cuando un haz ultrasónico se introduce o se refleja en un sólido con un cierto ángulo de incidencia. Para un haz de onda de compresión pura (longitudinal) que incide sobre una interfaz, en el segundo medio se refracta una onda de compresión y además se genera una onda de corte (transversal), como se observa en la **Figura 2**. Para pequeños ángulos de incidencia, la amplitud de la onda de corte es pequeña y se puede ignorar, pero a medida que aumenta el ángulo de incidencia, aumenta la amplitud de la onda transversal. La ley de Snell establece que los dos modos no se refractarán con del mismo ángulo porque la velocidad de la onda de corte es menor que la onda de compresión ($c_{tran} < c_{long}$):

$$\frac{\text{sen} \alpha_{long 1}}{c_{long 1}} = \frac{\text{sen} \alpha_{long 2}}{c_{long 2}} = \frac{\text{sen} \alpha_{tran 2}}{c_{tran 2}} \rightarrow \alpha_{tran 2} < \alpha_{long 2} \quad (1.9)$$

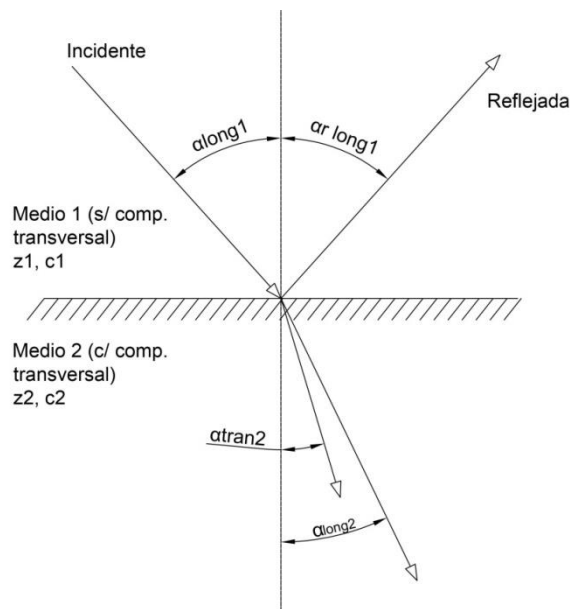


Figura 2. Refracción y conversión de modo.

El hecho de tener dos tipos de ondas viajando a distintas velocidades dentro de un mismo material puede ser perjudicial, por ejemplo, para realizar una inspección por ultrasonido. La solución a este problema puede hallarse aumentando el ángulo de incidencia hasta que el ángulo de la componente longitudinal (que posee un valor mayor que el de la transversal) alcance los 90°. Este ángulo se conoce como “primer ángulo crítico” y su expresión matemática es:

$$\alpha_{C I} = \text{sen}^{-1} \frac{c_{long 1}}{c_{long 2}} \quad (1.10)$$

Si el ángulo incidente se incrementa aún más allá del primer ángulo crítico, eventualmente la onda transversal también será refractada a 90°. El ángulo de incidencia para lograrlo se denomina "segundo ángulo crítico" y su expresión es:

$$\alpha_{C II} = \text{sen}^{-1} \frac{c_{long 1}}{c_{tran 2}} \quad (1.11)$$

En el segundo ángulo crítico, la onda cortante experimenta una conversión de modo y se convierte en una onda superficial o de Rayleigh, que se desplaza por la superficie de la pieza a una velocidad menor respecto de la velocidad transversal [9]:

$$c_R = c_t \frac{0,87 + 1,12\mu}{1 + \mu} \approx 0,9c_t \quad (1.12)$$

➤ **Absorción**

El sonido se propaga a través de la vibración de las partículas de un sólido, líquido o gas, y el movimiento de esas partículas causa fricción que absorbe parte de la energía. La velocidad a la que se absorbe la energía depende del material en donde se propaga el sonido y de la frecuencia del mismo. En general, cuanto mayor es la frecuencia, mayor es la absorción por lo que, a frecuencias más bajas del sonido, hay mayor penetración en el material.

➤ **Dispersión (Scattering)**

Las ondas acústicas se reflejan en las interfaces del material bajo ensayo, y los límites de grano en los sólidos son interfaces que pueden orientarse al azar en referencia al haz. Esto hace que parte del sonido se refleje en direcciones aleatorias produciendo una "dispersión" (en inglés "scattering"). El material de grano muy fino causa muy poca dispersión, mientras que en materiales de grano grueso el fenómeno es más notorio. Mientras que la energía dispersada que no llega al transductor receptor es energía perdida, la energía dispersada que sí retorna al receptor crea pequeñas indicaciones en función del tiempo, generando (junto con otros factores) lo que se conoce como "ruido de grano o estructural", que ocupa toda la banda del transductor y que en ocasiones puede enmascarar las señales de discontinuidades.

1.2.3 Phased Array

En el campo de los END industriales existen diversas técnicas de inspección para determinar el estado de un componente antes de un posible fallo. Sin embargo, a la hora de realizar inspecciones volumétricas solo se destacan dos importantes técnicas: la radiografía industrial y el ultrasonido. Ésta última sobresale por no generar radiaciones ionizantes, además, permite su aplicación durante el servicio del componente desde una de sus caras para detectar discontinuidades internas.

Asimismo, las técnicas de US, con la evolución de la tecnología en las últimas décadas, se han consolidado como una técnica habitual de diagnóstico por imágenes en el sector industrial y en la evaluación de materiales y de estructuras, no solamente mediante la detección y medición de defectos sino también mediante la caracterización del material del componente estudiado [12].

No obstante, a la hora de realizar una localización segura de defectos internos (grietas, delaminaciones, etc.), cualquiera sea la orientación, las capacidades de detección de las técnicas tradicionales de US quedan limitadas. La metodología convencional, para aumentar la probabilidad de detección de defectos con orientaciones arbitrarias, requiere el uso de múltiples cuñas de adaptación que deben ser interpuestas entre transductor y pieza para examinar el interior con distintos ángulos [13]. En consecuencia, el método termina resultando costoso en tiempo de inspección y poco robusto [14].

La tecnología de Phased Array (PA) se ha consolidado como una variante dentro del ámbito de los ensayos por ultrasonido, que a diferencia del método convencional, emplea transductores formados por una matriz de N elementos piezoeléctricos y utiliza todos o un conjunto de ellos para emitir un pulso ultrasónico que se propaga en una dirección predeterminada [15], [16]. La tecnología PA permite realizar la deflexión y el enfoque del haz en una determinada profundidad, controlando el retardo de los pulsos de excitación de los elementos del array [17], [18]. De esta manera, se pueden realizar distintas clases de barridos (angulares – S-scans, o lineales – B-scans) sin la necesidad de mover el transductor. En consecuencia, la tecnología PA ofrece diversas variantes de imágenes que la hacen un método de ensayo más fiable y flexible en comparación con la técnica tradicional de US [19].

1.2.3.1 Reseña histórica del PA

La tecnología de PA en sus comienzos tuvo su campo de aplicación en el diagnóstico médico por imágenes [20], aunque el término específico era también usado en una tecnología referida a antenas de radares y radioastronomía [21]. A principio de los años '80s se produjo la ampliación del ámbito de aplicaciones de esta tecnología desde la medicina hacia el sector industrial [22], impulsado por el desarrollo de materiales piezoeléctricos y mejoras en la tecnología de fabricación de sensores [23]–[26].

A finales de los años 90s la tecnología de PA fue incorporada como un nuevo método de END tanto en los libros específicos de ultrasonido como en los manuales de capacitación para ingenieros y técnicos. La mayoría de las aplicaciones de PA en esta época estuvieron relacionadas a la inspección de los recipientes de reactores nucleares, grandes ejes forjados y componentes de turbinas de baja presión.

Luego con el devenir de avances en la tecnología de nuevos materiales piezocompuestos, en el micromaquinado, en la microelectrónica, y en el poder computacional (paquetes de simulación para pruebas de diseño y el mejoramiento del software específico), contribuyeron a un extenso desarrollo de la tecnología de PA. La técnica se enfocó principalmente en intentar resolver distintos problemas referentes a la inspección como ser:

- 1- Cubrir la necesidad de detectar fisuras localizadas a diferentes profundidades y con orientaciones aleatorias mediante el uso de un mismo transductor colocado en una

posición fija. Conocer con adecuada precisión la ubicación, el tamaño y la orientación de defectos críticos en la pieza.

- 2- Satisfacer el requerimiento de aumentar la confiabilidad del escaneo, y al mismo tiempo incrementar la productividad mediante la reducción en los tiempos de preparación de la inspección.
- 3- Mejorar la relación Señal-Ruido (o SNR, del inglés Signal-to-Noise Ratio).
- 4- Aumentar el nivel de accesibilidad en las inspecciones en componentes complejos, por ejemplo, en los reactores de tipo PWR/BWR (del inglés Pressurized Water Reactor / Boiling Water Reactor), y lograr la detección y dimensionamiento de pequeñas fisuras producidas por corrosión bajo tensión (o SCC - del inglés Stress Corrosion Cracking) en componentes de turbinas con geometrías complejas.
- 5- Proporcionar un informe cuantitativo fácil de interpretar, puesto que se tratan de evaluaciones críticas en la ingeniería.

Otros sectores industriales, tales como el aeroespacial, el de defensa, petroquímicas, etc., requerían mejoras similares, aunque las necesidades específicas varían para cada rama de aplicación. Sin embargo, los requisitos que se centran alrededor de las características principales de la tecnología de PA son:

- 1- **Velocidad.** La tecnología de PA permite el escaneo electrónico, que puede alcanzar hasta un orden de magnitud más rápido que el muestreo convencional.
- 2- **Flexibilidad.** A diferencia de las sondas convencionales de ultrasonido, una única sonda PA puede cubrir una amplia gama de aplicaciones.
- 3- **Configuraciones electrónicas.** Las configuraciones de diferentes conjuntos de parámetros se pueden realizar simplemente cargando un archivo que incluye hasta el proceso de calibración.
- 4- **Sonda de dimensiones reducidas.** Para algunas aplicaciones, el acceso es un problema importante. Un transductor de phased array pequeño es capaz de proporcionar el equivalente a múltiples transductores convencionales.

1.2.3.2 Principios de la formación de imágenes por PA

➤ Transductor Multielemento (Array)

A diferencia de un transductor convencional, que se construye con un único cristal piezoeléctrico (monoelemento), un array contiene una serie de elementos piezoeléctricos individuales de pequeño tamaño, que pueden estar distribuidos en forma lineal (array 1D) o matricial (2D), entre otras configuraciones. Cada elemento es controlable de forma independiente tanto en emisión como en recepción.

Mientras que en un transductor monoelemento el haz que se genera, tiene características fijas y están determinadas por los parámetros geométricos del cristal, en un array se puede modificar electrónicamente las características del haz (deflexión y focalización) controlando electrónicamente la activación de los elementos, tanto en emisión como en recepción.

Los arrays lineales pueden deflectar (desviar el haz angularmente) y focalizar únicamente en el plano que contiene a la línea del array y al eje de propagación del haz y, por lo tanto, generan imágenes planas. Los arrays 2D pueden deflectar y focalizar dentro de un ángulo sólido, con lo que consiguen generar imágenes volumétricas.

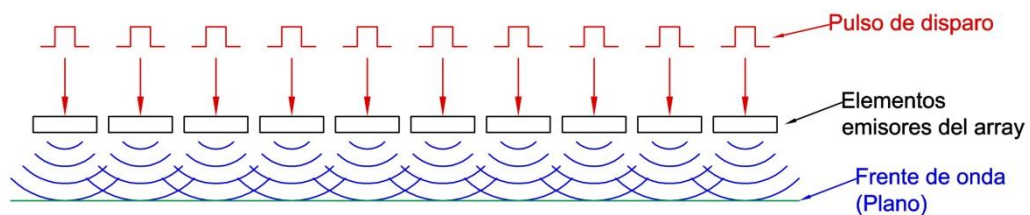


Figura 3. Array emitiendo un frente de onda combinado de característica plana.

La capacidad de producir una deflexión o enfocar el haz cuando se produce una emisión a través de un array se basa en el principio de Principio de Fresnel – Huygens, que establece que todo punto de un frente de onda inicial puede considerarse como una fuente de ondas esféricas secundarias. Siendo en este caso, que cada elemento del array se comporta como una fuente puntual de ondas y la

envolvente de las ondas generadas conforma el frente de onda combinado. Por lo que si se excita a los emisores con un retraso temporal desfasado linealmente (**Figura 4 izquierda**) se produce un frente de onda con una desviación angular.

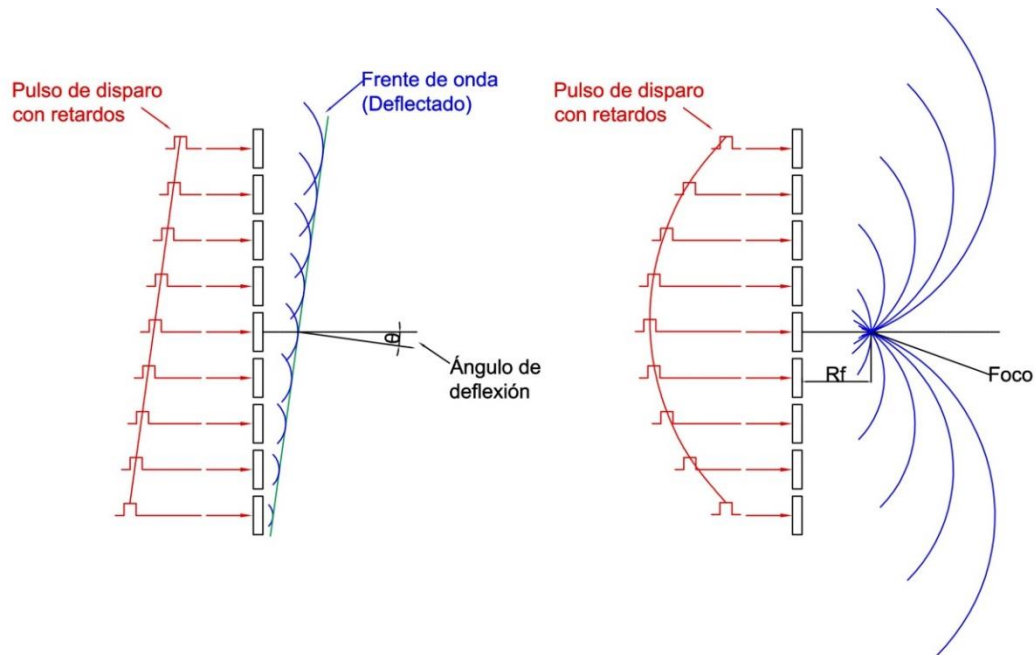


Figura 4. Deflexión y focalización de haz emitido por un array.

Además, se puede producir una focalización si se retrasa el disparo de cada elemento de tal manera que los frentes de ondas individuales coincidan en el tiempo sobre la posición del foco. Con este principio es posible enfocar el haz ultrasónico en cualquier punto dentro del campo cercano del array. La **Figura 4** (derecha) muestra el proceso para generar un foco sobre el eje axial del array. En el foco se generará una interferencia constructiva aumentando en un factor K_N la intensidad del campo acústico producido por cada elemento, mientras que, en otros puntos la intensidad resultante será inferior al no darse esta condición. El conjunto de retardos aplicados al excitar los diferentes elementos del array se denomina *ley focal en emisión* y, en general, puede combinar la deflexión y la focalización del haz.

Matemáticamente si se considera una agrupación de N fuentes equiespaciadas, con la primera de ella situada en el origen de coordenadas, la presión resultante en un punto (foco) del campo acústico puede expresarse en coordenadas polares (radio r , ángulo θ) y para un dado tiempo t como [5]:

$$p(r, \theta, t) = \sum_{i=1}^N \frac{A_p}{r} e^{j(\omega t - kr_i)k \times pitch \times sen(\theta)} \quad (1.13)$$

Donde

r_i : distancia de cada fuente al foco.

A_p : amplitud de la presión acústica.

ω : frecuencia de la onda.

k : número de onda.

$pitch$: separación entre elementos del array

Si se asume que para el campo lejano ($r \gg L_{array}$) existe un paralelismo entre los rayos, se reemplaza $\Delta r = pitch \times sen(\theta)$, y se trabaja matemáticamente la fórmula se obtiene una expresión de la presión en el campo lejano de la forma:

$$p(r, \theta) = P_{max}(r)H(\theta) \quad (1.14)$$

Donde P_{max} es la máxima amplitud de presión posible:

$$P_{max}(r) = N \frac{A_p}{r} \quad (1.15)$$

Y se define como función de directividad o del factor del array $H(\theta)$:

$$H(\theta) = \frac{sen\left(\frac{N}{2}k\Delta r\right)}{sen\left(\frac{1}{2}k\Delta r\right)} \quad (1.16)$$

Por otro lado, para calcular la ley focal en emisión (conjunto de retardos aplicados para excitar los elementos del array) que combina la deflexión y la focalización del haz se debe considerar el esquema mostrado en la **Figura 5**:

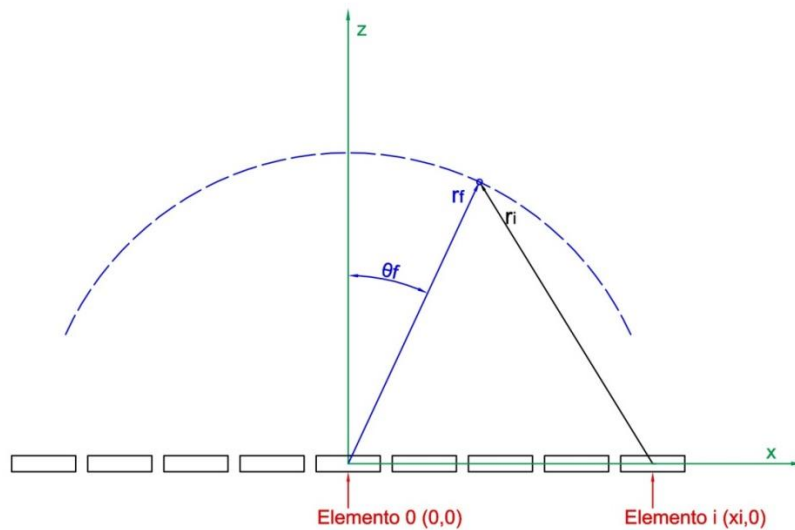


Figura 5. Cálculo de las leyes focales en emisión para la posición del foco (r_f, θ_f) .

Conociendo los vectores \vec{r}_i y \vec{r}_f , que parten del elemento i y del centro de coordenadas $O(0,0)$ finalizando en el foco F de coordenadas polares (r_f, θ_f) , y los tiempos de vuelo (es decir la distancia sobre la velocidad de la onda en el medio) en emisión asociados a cada elemento t_i^E , se elige un tiempo de retardo en emisión τ_i^E de tal manera que todos los frentes de onda individuales lleguen al foco simultáneamente. Es decir, que la suma retardo más tiempo de vuelo sea constante ($\tau_i^E + t_i^E = cte$). Considerando como el origen de coordenadas al elemento central del array (**Figura 5**), se obtiene [27]:

$$\tau_i^E = \frac{|\vec{r}_f| - |\vec{r}_i|}{c} = \frac{1}{c} (R_f - \sqrt{R_f^2 + x_i^2 - 2R_f x_i \text{sen}\theta_f}) \quad (1.17)$$

➤ Operación en Recepción

Cuando las ondas se propagan, desde cada uno de los elementos del array hacia el material, y encuentran en su camino sónico un reflector (un punto con un cambio de impedancia acústica), éste se comporta como emisor generando señales que vuelven hacia el array desalineadas temporalmente debido las diferencias en los tiempos de propagación desde el reflector a cada uno de los elementos receptores (**Figura 6**). Para alinear correctamente las señales y sumarlas de forma coherente, se emplea un

conformador de haz que aplica las operaciones de retraso y suma, para reforzar la señal que procede del foco con respecto al ruido o a señales producidas en otros puntos del medio.

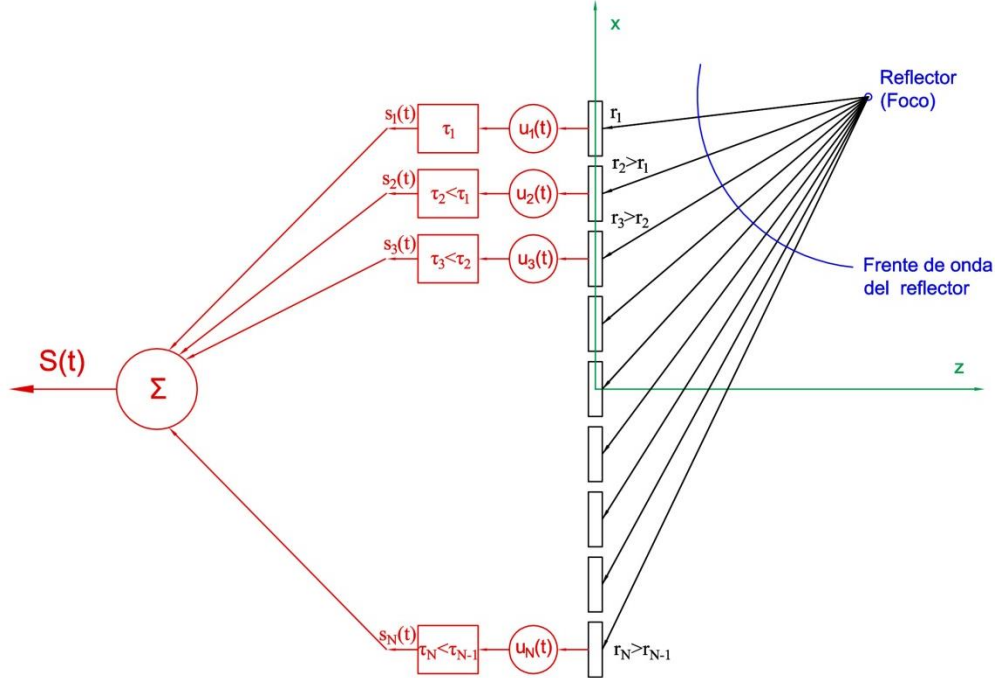


Figura 6. Conformación del haz en recepción para el reflector (o foco F).

El procedimiento de conformación opera de la siguiente manera: a la señal recibida por el elemento i en función del tiempo $u_i(t)$, se le aplica un retardo τ_i^R , que compensa las diferencias en los tiempos de vuelo desde el foco (reflector) F hasta cada elemento i . A las señales retrasadas $s_i(t)$ se les denomina datos de apertura:

$$s_i(t) = u_i(t - \tau_i^R) \quad (1.18)$$

Luego, los datos de apertura son sumados para obtener la señal A-scan de salida:

$$S(t) = \sum_{i=1}^N s_i(t) = \sum_{i=1}^N u_i(t - \tau_i^R) \quad (1.19)$$

El sistema que implementa la operación (1.19) es conocido como *conformador de retardo y suma*. El procedimiento para el cálculo de los retardos en recepción es

similar al de la ley focal en emisión. Para la geometría de la **Figura 5** y, suponiendo que el haz se emitió desde el centro del array, el tiempo de ida al foco F y de vuelta al elemento i es:

$$t_i^R = \frac{|\vec{r}_f| + |\vec{r}_i|}{c} = \frac{1}{c} \left(R_f + \sqrt{R_f^2 + x_i^2 - 2R_f x_i \text{sen} \theta_f} \right) \quad (1.20)$$

También el retardo en recepción se elige de tal manera que $\tau_i^R + t_i^R = cte$. Tomando como referencia el tiempo de ida y vuelta desde el centro del array hasta el foco, se obtiene que:

$$\tau_i^R = \frac{2|\vec{r}_f|}{c} - t_i^R = \frac{1}{c} \left(R_f - \sqrt{R_f^2 + x_i^2 - 2R_f x_i \text{sen} \theta_f} \right) \quad (1.21)$$

Cuando los retardos en recepción se calculan según (1.21) y se aplican según (1.18), la señal $S(t)$ representa la reflectividad del medio en la dirección θ_f , y tiene mayor sensibilidad a los reflectores ubicados a la profundidad del foco R_f . El conjunto de retardos τ_i^R se denomina *ley focal en recepción*.

Aunque los retardos en emisión y en recepción se calculan mediante la misma expresión, (1.17) y (1.21), existen diferencias importantes entre ambos procesos. En emisión, sólo puede crearse un foco por cada disparo, esto es, una vez producida la excitación de todos los elementos, el foco no puede ser modificado puesto que la onda se está propagando. En cambio en recepción, se abre la posibilidad de modificar dinámicamente los retardos de forma tal que el foco vaya siguiendo al frente de ondas durante su propagación. Tanto si se aplica una ley focal en emisión para deflectar el haz en la dirección θ_f , como si la emisión es omnidireccional desde el centro del array, la posición del frente de ondas en la dirección de propagación es:

$$R_w = c \cdot t \quad (1.22)$$

Entonces, para que la posición del foco coincida con la del frente de ondas para todo tiempo t , basta con elegir $R_f = R_w = c \cdot t$ y sustituir en (1.21) para obtener:

$$\tau_i(t) = t - \left(\sqrt{t^2 - \frac{2tx_i \text{sen}\theta_f}{c} + \frac{x_i^2}{c^2}} \right) \quad (1.23)$$

Aquí se observa que la ley focal en recepción varía de forma continua con el tiempo, y depende tanto de la posición x_i del elemento como del ángulo de deflexión θ_f . Por lo que, idealmente la variación de los retardos en cada elemento debería realizarse de forma continua para que el foco siga al frente de onda en su propagación. Al proceso de modificar los retardos en recepción se lo conoce como *focalización dinámica en recepción*.

En la imagen de PA, tanto la ley focal de emisión como la de recepción tienen el mismo ángulo de deflexión θ_f . De esta forma, con la emisión se “insonifica” con mayor intensidad los reflectores en la dirección θ_f y en recepción se favorece la composición de los ecos que provienen de la misma dirección, reforzando la directividad del haz.

1.2.3.3 Imágenes de Phased Array

A las diferentes formas de representación de un ensayo por ultrasonido empleando PA se las conoce como vistas ultrasónicas o barridos (*Scans*) y son imágenes contenidas en el plano definido por las diferentes relaciones entre el camino ultrasónico, y los parámetros de exploración.

➤ Representación A-Scan

Es la más simple y extendida de todas las representaciones. La denominación “A” viene de “amplitud”, y se trata de la representación (vista) de la amplitud de pulso ultrasónico recibido en función del tiempo de vuelo o de la trayectoria sónica. Un A-scan (**Figura 7**) puede visualizarse como una señal de radiofrecuencia (RF) o como onda rectificada (señal de video) de la amplitud relativa con respecto al valor máximo, ya sea en valores decimales (o porcentuales) o en escala de decibeles.

$$\text{Amplitud Normalizada: } A_n = \frac{A}{A_{max}} \quad (1.24)$$

$$\text{Amplitud en db: } A_{db} = 20 \log \left(\frac{A}{A_{max}} \right) \quad (1.25)$$

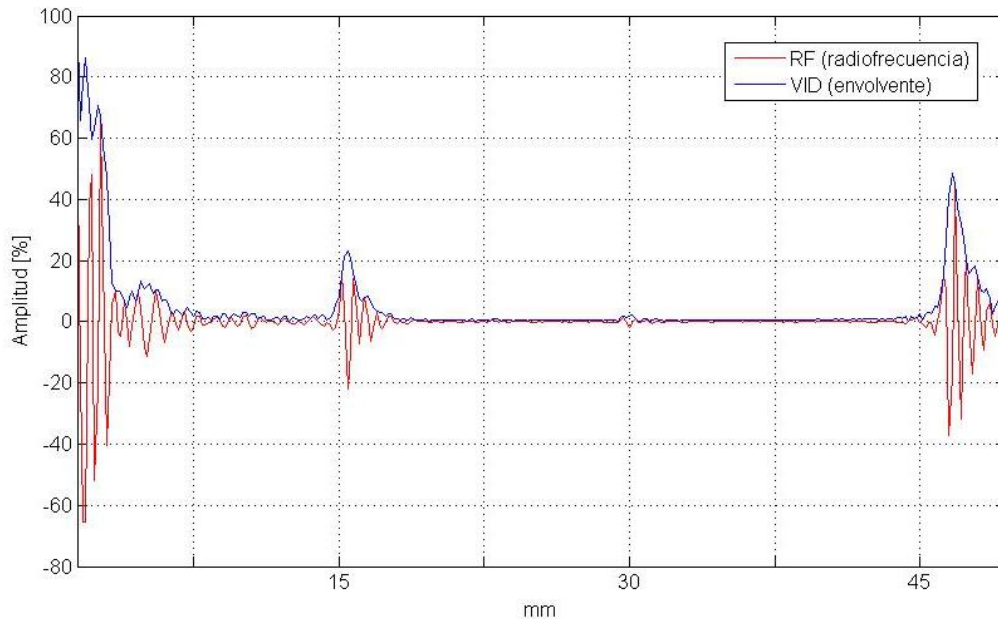


Figura 7. A-Scan en radiofrecuencia y en envolvente de un reflector ubicado a 15 mm de profundidad. Se aprecian de izquierda a derecha, el pulso de entrada, la señal del reflector y el eco de fondo de la pieza.

➤ Representación tipo B-Scan y S-Scan

El B-Scan es una vista 2D de los datos registrados de un barrido con haces de ultrasonidos. Normalmente, el eje horizontal es la posición del barrido (escaneo) y el eje vertical es la trayectoria o el tiempo de vuelo de haz de ultrasonido. Los ejes pueden ser invertidos, dependiendo de la pantalla. La posición de los datos mostrados está relacionada con las posiciones del transductor en el momento de la adquisición. Esencialmente, un B-scan es una serie de A-scans puestos de manera consecutiva. Se representa en coordenadas rectangulares y se utiliza una paleta de colores (incluso en escala de grises) para representar la intensidad de las señales A-scans.

Los B-Scans son efectivamente la eco-dinámica en el eje del movimiento electrónico del punto de emisión haz. Las imágenes B-Scans pueden ser obtenidas empleando el haz con orientación normal o con un ángulo de deflexión constante (**Figura 8**). Por lo tanto, para una imagen PA, las leyes focales de emisión y recepción se configuran para un subconjunto de elementos del array (subapertura) y luego, en cada disparo, la

posición de la subapertura dentro del array se modifica para lograr el desplazamiento del haz de forma electrónica utilizando la misma ley focal.

Las imágenes B-San ofrecen gran información sobre la tipología y posición de los defectos, pero a su vez pueden presentarse con distorsiones, falta de precisión u otros inconvenientes debido a factores que afectan a la propagación del haz ultrasónico.

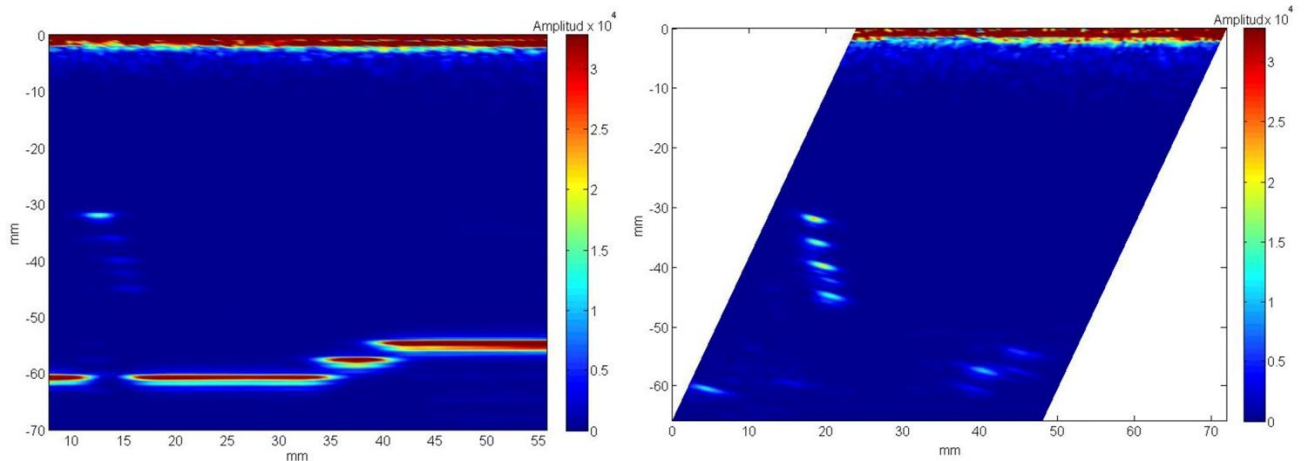


Figura 8. Imagen B-Scan de cinco reflectores en formato lineal (Izquierda).
Barrido lineal con un ángulo de deflexión de -20° (Derecha).

Un tipo particular de imagen B-Scan en la modalidad de PA es lo que se denomina un escaneo sectorial o S-Scan, y también representa una vista bidimensional de todas las trazas A-Scans. No obstante, la subapertura empleada se mantiene constante y en cada disparo las leyes focales (de emisión y de recepción) se modifican de manera electrónica para lograr sucesivas deflexiones y barrer con el haz dentro de un rango angular. La imagen S-Scan se representa en coordenadas polares, en donde el eje horizontal indica la distancia proyectada (ancho de la pieza ensayada), y el eje vertical corresponde a la profundidad (**Figura 9**).

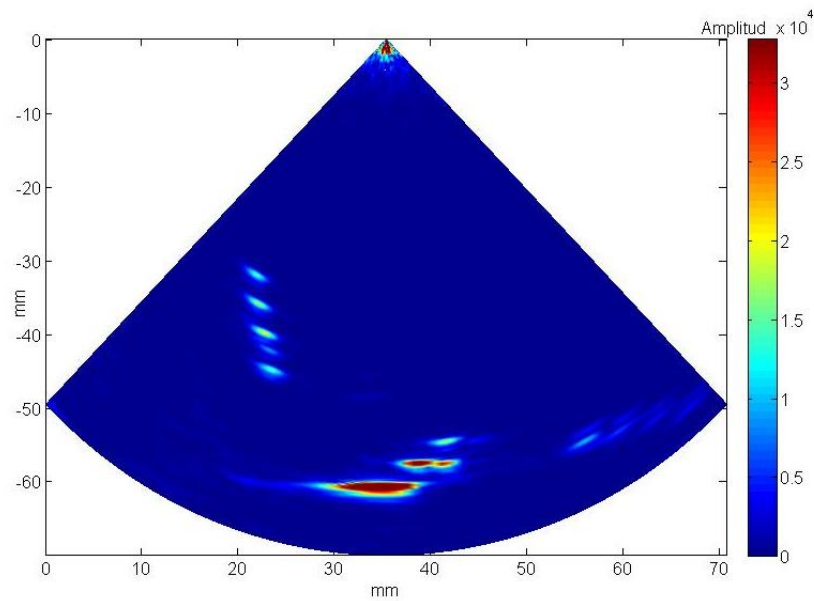


Figura 9. Imagen S-Scan o sectorial de cinco reflectores y fondo de pieza con entallas escalonadas.

1.2.3.4 Problemas y limitaciones del PA

➤ Alcance de un único barrido

Uno de los inconvenientes típicos del PA viene como consecuencia de la errónea creencia de que con un simple barrido angular de exploración (S-Scan) que abarque un amplio rango angular, es suficiente para detectar todos los defectos en un componente o soldadura. Esta concepción es absolutamente equivocada, porque las capacidades de detección y ubicación se encuentran íntimamente relacionadas con la posición y orientación del defecto. Por ejemplo, una fisura orientada oblicuamente al frente de onda se comportará como un reflector especular, y por tanto, no tendrá una señal de respuesta tan clara como una que esté orientada de forma perpendicular a la dirección de propagación del haz. Esto se debe a que a pesar de producirse una señal de difracción en la punta de la fisura para el primer caso, ésta tendrá una intensidad tan baja en comparación a otros ecos reflejados, que para identificarla en la pantalla se requerirán elevados niveles de ganancia, acción que conlleva a la saturación de las otras indicaciones y a un considerable deterioro de la relación señal ruido (SNR) de la imagen [9].

➤ **Problemas de foco**

Otro problema que se puede presentar al realizar un ensayo de PA sin el conocimiento suficiente, es relacionar la ubicación del foco y la profundidad de campo asociada a esta. Dicho de otra forma una mala selección de la profundidad del punto focal, combinado con una inadecuada apertura (elementos activos para generar el haz), puede ocasionar que los defectos sean pasados por alto, incluso cuando éstos tengan un tamaño considerable, debido a una falta de profundidad del campo acústico [28].

➤ **Falta de resolución**

Un inconveniente común con otras técnicas de diagnóstico y evaluación por imágenes es la falta de resolución. En el caso de imágenes por ultrasonido se pueden definir dos tipos de resoluciones distintas: axial y lateral. Resolución axial es la capacidad para discriminar dos reflectores que se encuentran alineados con el eje axial del transductor (es decir en la dirección de propagación del haz). Este parámetro depende del ancho de banda del pulso ultrasónico [29], de manera que al generar pulsos con pocos ciclos (banda ancha) mejora la resolución axial de la inspección, ya los ecos producidos por dos reflectores alineados no se superpondrán y serán claramente distinguibles. Por otra parte, la resolución lateral se la define como la capacidad para separar dos reflectores puntuales que se encuentran en una recta perpendicular a la dirección de propagación del haz de ultrasonido. La resolución lateral viene dada por el ancho del frente acústico utilizado, que en el caso del PA está determinada por el ancho del lóbulo principal, que es inversamente proporcional al tamaño de la apertura (D) [27]. Por lo que dependerá fundamentalmente de las características geométricas del array y los elementos que la componen, por ejemplo ampliando la distancia d (valor de pitch) entre elementos se aumenta $D=N \cdot d$ y mejora la resolución angular. No obstante, para $d > \lambda/2$ y ángulos elevados de deflexión, aparecen *lóbulos de rejilla*, que se muestran como artefactos (cuyo concepto se definirá en un apartado posterior) difusos en la imagen que imposibilitan la detección de reflectores de menor nivel [5]. También existen otros métodos no tan dependientes de la geometría cuyo objetivo es aumentar la resolución lateral mediante la electrónica y el uso herramientas computacionales [30], [31].

➤ **Falta de contraste**

La resolución de contraste se refiere a la capacidad de distinguir entre diferentes amplitudes de eco de estructuras adyacentes. Dicho de otra forma, es la mínima diferencia de impedancia acústica del medio que se puede mostrar con dos niveles de intensidad diferentes en la imagen, por lo que sirve para detectar visualmente dos regiones del medio con distintas texturas. Mientras que en ensayos sobre tejidos biológicos el efecto que afecta el contraste es conocido como moteado (o del inglés *speckle*) y es un tipo particular de ruido que degrada la definición de los detalles finos y los bordes [32], y es producto de las interferencias entre ecos producidos por múltiples dispersores (*scatterers*) que no pueden ser resueltos individualmente. Mientras que en materiales de aplicaciones industriales (aceros austeníticos, fundición, compuestos, etc.), la estructura de sus granos, produce en sus bordes efectos similares, es decir ecos de múltiples dispersores que presentan una frecuencia de espectro muy similar a la de los ecos de reflectores, reduciendo el contraste de los defectos reales [33].

➤ **Limitaciones en el rango dinámico**

Se llama rango dinámico a la magnitud de la intensidad más alta en relación a la más baja, sin producir efectos de saturación en ambos. Este valor depende del número de elementos del array que sean utilizados, ya que se ve afectado por la presencia de *lóbulos laterales* (generados por interferencias entre las ondas de borde y cuya amplitud no suele superar el 20% del lóbulo principal) [5], [27]. También guarda relación con el ancho de banda en el caso de una señal pulsada y con una etapa de compresión en el proceso de obtención de la señal, se produce una disminución del valor del rango dinámico [34].

➤ **Relación señal ruido (SNR)**

El ruido en las imágenes ultrasónicas se puede clasificar en dos grupos distintos: *ruido eléctrico* y *ruido de grano*. El ruido eléctrico tiene su origen en la circuitería electrónica (también a veces llamado ruido del instrumento) y es consecuencia de las perturbaciones estocásticas en el circuito del instrumento, tales como la agitación térmica de la electrónica en los elementos del circuito, o una anormal agitación de la electrónica de los elementos semiconductores. Este ruido tiene características de una variable estocástica continua en la que, para cada instante de tiempo, el valor de la

señal es arbitrario. El ruido eléctrico más comúnmente encontrado es el ruido blanco, que tiene una densidad espectral de intensidad plana, además se considera que las diferentes mediciones no están correlacionadas, por lo que el promediado de la señal puede eliminar este ruido [35]. Este tipo de ruido puede disminuirse en gran medida con un cuidadoso diseño electrónico, y con el uso de filtros pasabandas, los cuales dejan pasar sólo las componentes que quedan dentro de la banda de frecuencias del transductor. Sin embargo, no puede eliminarse completamente.

Por otro lado, el ruido de grano es una fuente típica de ecos no deseados, producidos por la microestructura interna del material y que resultan significativos en muchos tipos de materiales. Cada grano se comporta como un punto de dispersión (o *scattering* en inglés), produciendo un eco que, aislado o (más habitualmente) superpuesto con otros ecos procedentes de otros granos, conforma lo que se conoce como ruido retrodispersado (*backscattering*), pudiendo así ocultar los ecos producidos por un posible defecto [36]. La eliminación del ruido de grano es más compleja, pues ocupa la misma banda de frecuencias que la señal, por lo que no se puede cancelar con filtros convencionales o con promediados. Sin embargo, se han desarrollado diversas técnicas que permiten aminorar sus efectos [27].

➤ **Presencia de artefactos**

Se define como artefacto a una indicación de carácter artificial causada por una interferencia extraña, implica una distorsión en el procesamiento de datos y puede generar una interpretación errónea o un resultado incorrecto. En el caso de los artefactos de imágenes ultrasónicas de origen acústico están relacionados a las características de emisión y resolución, al camino de propagación y a la atenuación del medio. Algunos ejemplos comunes de artefactos en imagen PA son la presencia de *lóbulos laterales* en el patrón de radiación del campo acústico [5], los *lóbulos de rejilla* (se producen debido a las distancias entre los elementos y los retardos de focalización, además a diferencia de los lóbulos laterales, los de rejilla presentan una amplitud similar al del lóbulo principal) [37], la presencia de *reverberaciones* (que se producen cuando se encuentran dos o más reflectores en la trayectoria del sonido, ocasionando así reflexiones múltiples debido a interferencias constructivas), y a *refracciones* dentro del material bajo ensayo [38].

2. Método propuesto

2.1 Hipótesis

En base a las ventajas y capacidades que ofrece la tecnología de PA respecto a los END por US convencional, se destaca en particular la posibilidad de realizar escaneos electrónicos que permiten obtener una diversidad espacial para el análisis. Esta ventaja es el disparador para formular la siguiente hipótesis:

Que la composición coherente de múltiples imágenes (B-Scans o S-Scans) adquiridas con direcciones diferentes mejorará notablemente la detección y evaluación de defectos con independencia de su orientación en el interior de la pieza.

Adicionalmente, al mejoramiento en las capacidades de observación y detección de defectos, la propuesta permitirá conformar toda la información de los barridos, ofrecer la posibilidad de clasificar los defectos por su tipo, tamaño y forma (cuestión que usualmente requiere un mayor tiempo de ensayo y de distintas mediciones [9]) y mejorar la SNR en la imagen compuesta, además de otros inconvenientes asociados a las limitaciones de un único escaneo.

2.2 Bases y precedentes

En el campo del diagnóstico médico por ultrasonido existen ciertos objetos de estudio que poseen como característica un atributo conocido como naturaleza especular. Esto quiere decir que la señal obtenida al evaluarlos depende fuertemente de la orientación de los cuerpos reflectores con respecto al frente de onda ultrasónico. Las primeras investigaciones referentes a la composición espacial de imágenes de PA tenían como objetivo resolver con una mayor precisión ciertos detalles anatómicos, presentes dentro del cuerpo humano, que poseen naturaleza especular, además de lograr un incremento en el campo de visión del escaneo. Esta línea el trabajo fue abordada por Shattuck y Von Ramm [39] y consistía en la composición en tiempo real de 4 barridos sectoriales realizados con 4 aperturas adyacentes de 32 elementos utilizando un array de 128 elementos. En esta propuesta, cada sección se utiliza para producir un barrido sectorial independiente, y debido al gran tamaño de las secciones con respecto al transductor, estos escaneos se superponen. En las áreas superpuestas, se produce la

composición que es captada por una cámara que realiza la conversión del barrido a un formato de televisión estándar de la época. Este proceso se realizaba en un sistema compuesto por un ordenador, un demultiplexor 1:4, un circuito de transmisión, un transductor (4 segmentos de 32 elementos), multiplexor, preamplificador y un circuito de recepción (Figura 10).

Los resultados obtenidos con este método demuestran el aumento en el campo de visión del ensayo y la reducción de los lóbulos laterales y otras anomalías. Sin embargo no se observó una reducción significativa del moteado (*speckle*), ya que el sistema contaba con varias limitaciones como ser el escaso número de elementos activos (emisión y recepción) en cada segmento del transductor. A esto se sumaba el efecto de parpadeo causado por bajo número de imágenes por segundos (FPS del inglés "Frame Per Second") correspondiente cada barrido que estaba condicionado por los FPS del formato televisivo, y el insuficiente rango dinámico de la escala de grises en las zonas con superposición de menos de 4 barridos.

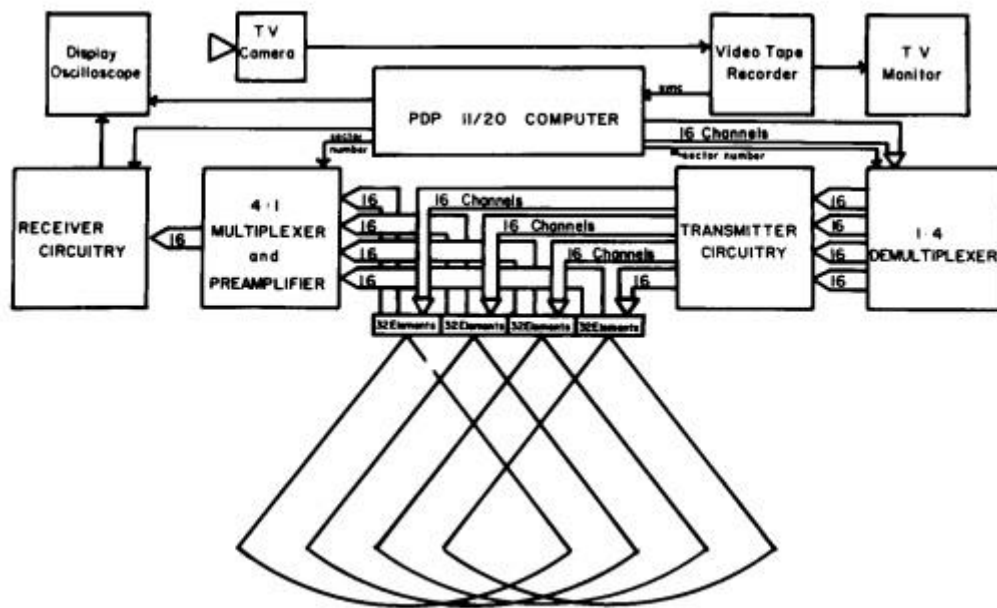


Figura 10. Shattuck y Von Ramm (1982). Diagrama del sistema para el escáner propuesto. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0161734682900943>.

De forma similar Berson *et al.* [40] realizaron la composición de imágenes ultrasónicas realizados con un array lineal (1D) pero empleando barridos del tipo lineal con diferentes ángulos de deflexión del haz. En esta propuesta se observa que para el caso de una

composición de tres escaneos (con ángulos de 0° ; 12° y -12°) se produce un aumento en el nivel de detalle en la zona de superposición de barridos y un leve aumento del campo de visión. No obstante, la presencia de los lóbulos de rejilla provoca interferencias en las señales de eco y consecuentemente un efecto de difuminado que emborrona ciertas áreas de la imagen compuesta. Otros inconvenientes como la inhomogeneidad de la imagen final (producida por la sobrescritura en la zona de superposición), la presencia de patrones de Moire (interferencias formadas al superponer dos rejillas con ángulos o tamaños diferentes) y el efecto de parpadeo producido por la baja tasa de FPS condicionaron la calidad de la imagen resultante (**Figura 11**).

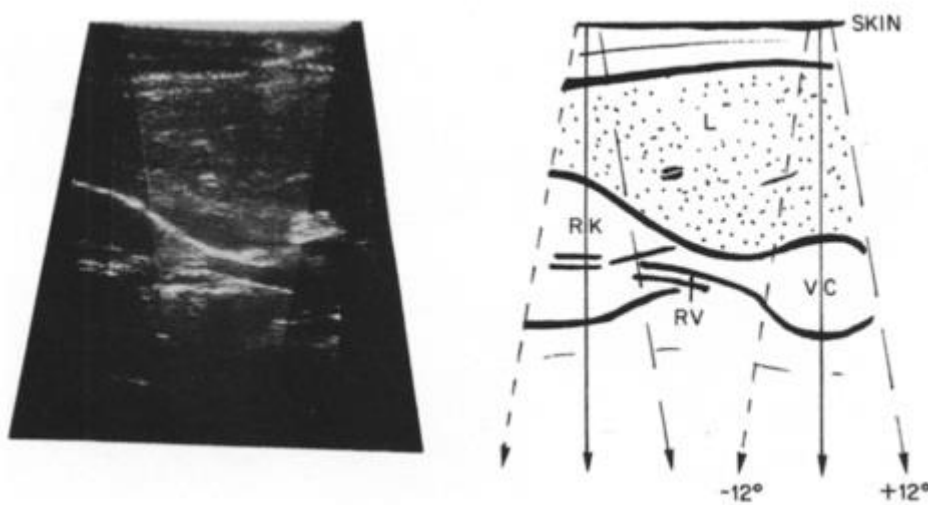


Figura 11. Berson et al. (1981). Escaneo compuesto de barridos lineales con diferentes ángulos. Fuente: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0161734681901620>

El sistema MACI (Multi-Angle Compound Imaging) propuesto por Jespersen *et al.* [41] plantea un método de diagnóstico médico basado en la composición de imágenes obtenidas con barridos lineales. Pero a diferencia de los casos anteriores, la propuesta permite combinar un mayor número de imágenes con diferentes ángulos de deflexión. Las imágenes resultantes ofrecen una mejora en la SNR, una reducción del moteado (o *speckle*) característico del ultrasonido en medios biológicos, y un incremento en las capacidades de detección en zonas de bajo contraste y en la nitidez de los bordes de los tejidos (**Figura 12**).

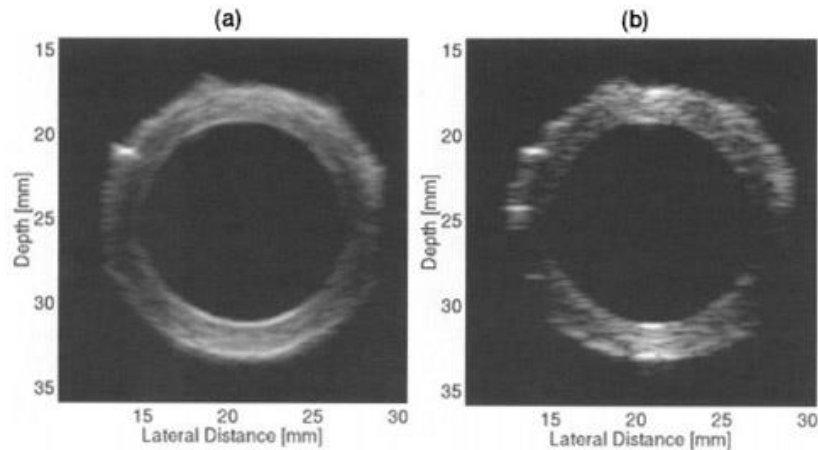


Figura 12. Jespersen et al. (1998). (a) Imagen compuesta y (b) convencional de una aorta torácica explorada en agua desmineralizada a 43 mm de profundidad.

Disponible en:

<http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/016173469802000201>

El trabajo realizado por Robinson y Knight [42] plantea la comparación de cuatro métodos de composición de imágenes B-Scans digitales, partiendo en este caso no de la composición de imágenes diferentes sino de la composición de los datos de las líneas individuales del barrido empleando métodos de detección de pico, valor mínimo, integración y promedio. En la composición realizada empleando el método de detección de pico (esto es, tomar el máximo valor de señal obtenida para cada pixel) se observa que en las áreas cercanas a las estructuras fuertemente reflectantes no se ven significativamente oscurecidas por el efecto de la amplitud del haz. Por otro lado, en el método basado en el promediado de valores, se observa un aumento considerable en la resolución de la imagen compuesta (**Figura 13**). Por su parte, el método de detección del valor mínimo aplicado correctamente puede mejorar la resolución de objetos puntuales, y aumentar la capacidad de diferenciar reflectores especulares de señales producidas por el efecto de moteado (o *scattering*) intenso. Sin embargo, un uso incorrecto del método puede conllevar un aumento desmedido del ruido. Además, en este trabajo se destaca que es posible reducir el ruido característico de las imágenes ultrasónicas digitales originado por la falta de píxeles (esto es, cuando el barrido produce algunos píxeles sin ningún dato recibido; por ejemplo, en imágenes sectoriales cuando la separación entre líneas de exploración excede la distancia entre píxeles) mediante un suavizado (*smoothing*) por ponderación, e interpolación de los valores entre muestras contiguas.

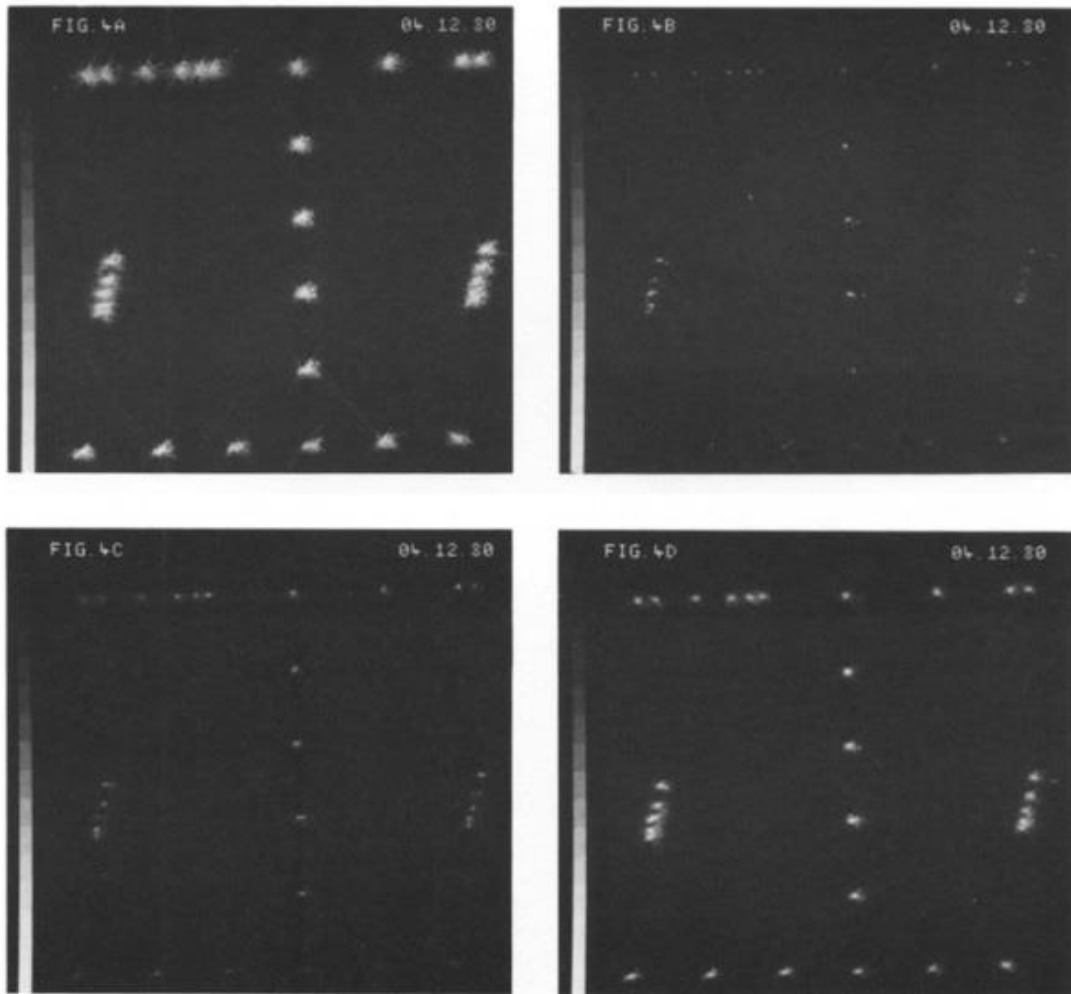


Figura 13. Robinson y Knight (1981). Imagen de la reconstrucción de datos tomados del objeto de prueba AIUM de 100 mm según la reconstrucción por a) detección de pico, b) mínimo, c) integración y d) promediado. Recuperado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0161734681901577>

Otros trabajos estudiaron las características de métodos alternativos de composición de imágenes ultrasónicas como ser la composición por superposición [43]. Este método como técnica de END demostró que al ensayar materiales de estructura cristalina de grano grueso el ruido coherente se reduce sensiblemente por el efecto de promediado de intensidades.

Entrekin *et al.*[44] lograron un método de composición espacial de imágenes en tiempo real, que mejora la información estructural real, y reduce los artefactos inherentes del ultrasonido, tales como el *speckle*, el emborronamiento y la caída de la intensidad acústica de las estructuras especulares con anisotropías. En el método propuesto por Montaldo *et al.* [45] para recombinar barridos que abarcan un rango angular de hasta 33° y en pasos de 0.47° o mayores, que son obtenidos con ondas planas y compuestos con una elevada tasa de FPS, se

observa un considerable aumento en calidad de imagen, especialmente en lo que refiere a resolución, contraste y mejoría de la SNR además, de lograr un aumento en la resolución temporal.

Rohling [46] propuso la composición de imágenes para un espacio tridimensional, logrando una mejoría en el valor de la SNR. No obstante, el proceso aumenta el nivel de errores en la definición de los objetos. Además, existen trabajos para la composición de imágenes desarrollados exclusivamente en el dominio de la frecuencia [47]–[49], en donde se logran importantes mejoras en la SNR y en el contraste de las imágenes resultantes.

Por otro lado el método descrito por Behar *et al.* [50] propone una composición de imágenes mediante el uso de tres transductores PA, uno central que opera como emisor y receptor y dos laterales que funcionan sólo como receptores. Luego las señales registradas por los tres receptores se combinan para generar la imagen final compuesta. Las simulaciones expuestas en el trabajo muestran que el método produce una mejora en la visibilidad, la detectabilidad y la resolución lateral de regiones de bajo contraste en tejidos biológicos, como consecuencia de la diversidad espacial que se obtiene.

De lo analizado en los casos tomados como el estado del arte de este trabajo, se observa que ya en los primeros métodos de composición (basados en técnicas analógicas bastante rudimentarias comparados con la tecnología actual) en la imagen resultante se obtenía:

- **aumento en el campo de visión,**
- **reducción de anomalías y**
- una **mejora de resolución y detalles** en la zona de superposición (aunque esta superposición significaba interferencias por las diferentes grillas de barrido que evidenciaban una inhomogeneidad en el contraste de la imagen compuesta).

De los trabajos posteriores se pueden inferir una serie de características comunes entre los resultados logrados, como ser:

- la **mejoría general de la SNR** en la imagen final,
- **reducción de los artefactos** característicos de las imágenes ultrasónicas (*speckle*), y
- **mejora en las capacidades de resolución.**

Sin embargo, a pesar de las virtudes mencionadas, las metodologías antes referidas poseen una serie de limitaciones e inconvenientes comunes que limitan sus aplicaciones como técnica evaluación en la industria. En particular:

- **Falta de flexibilidad:** muchas de las técnicas desarrolladas limitan el número de barridos o imágenes, al igual que los ángulos utilizados en el escaneo, además en muchos de los casos la posición del transductor es fija. Tampoco es posible intercambiar el tipo de barrido (angular o lineal) o combinarlos.
- **Falta de ensayos sobre materiales de uso industrial:** la mayoría de los métodos precedentes tienen como finalidad las aplicaciones de diagnóstico médico, por lo que las simulaciones y validaciones son realizadas sobre materiales biológicos o similares.
- **Imposibilidad de usar interfaz (zapata):** en el campo de los END es común el uso de zapatas o cuñas para realizar cambios en el modo de propagación, además de cumplir las funciones de proteger y adaptar el transductor a la pieza.
- **Limitaciones en el campo de visión y la diversidad espacial:** el campo de visión se incrementa por la superposición de barridos. Sin embargo el área de mejora es escasa, puesto que en la mayoría de las técnicas la posición del transductor es fija y los tipos de barridos admitidos no son flexibles.
- **Escasa resolución de defectos especulares:** las restricciones en la posición del transductor conllevan una posible incapacidad de detectar defectos con orientación desfavorable a la dirección de propagación del haz.

En base al estado del arte de los métodos de composición de imágenes ultrasónicas, este trabajo propone la realización de un método, que parte de las soluciones y capacidades ya alcanzadas y, que resuelve algunas de las principales limitaciones, tales como la flexibilidad en los barridos y la introducción de interfaces, para que sea aplicable como herramienta END dentro del ámbito industrial.

2.3 Composición de imágenes con alta resolución

El proceso que se propone consiste en representar sobre una matriz rectangular de píxeles, un conjunto de imágenes de ultrasonidos adquiridas en cualquier formato de escaneo (lineal o sectorial), sin perder la información espacial original y conservar todas las indicaciones libres

de distorsiones. Para tal fin, se ha diseñado un algoritmo basado en el método de interpolación bilineal empleando una técnica de remuestreo y ponderación de píxeles [42].

El algoritmo consta de diversas etapas (**Figura 14**), la primera es la obtención de las imágenes (B-Scans o S-Scans) de la zona de interés, capturadas desde diversas posiciones (distintos puntos de emisión). Las adquisiciones pueden ser realizadas con el transductor en contacto directo con la pieza, o bien empleando un medio de adaptación (agua o zapata), definiendo de esta manera dos escenarios diferentes (con y sin interfaz) para ejecutar el algoritmo de interpolación.

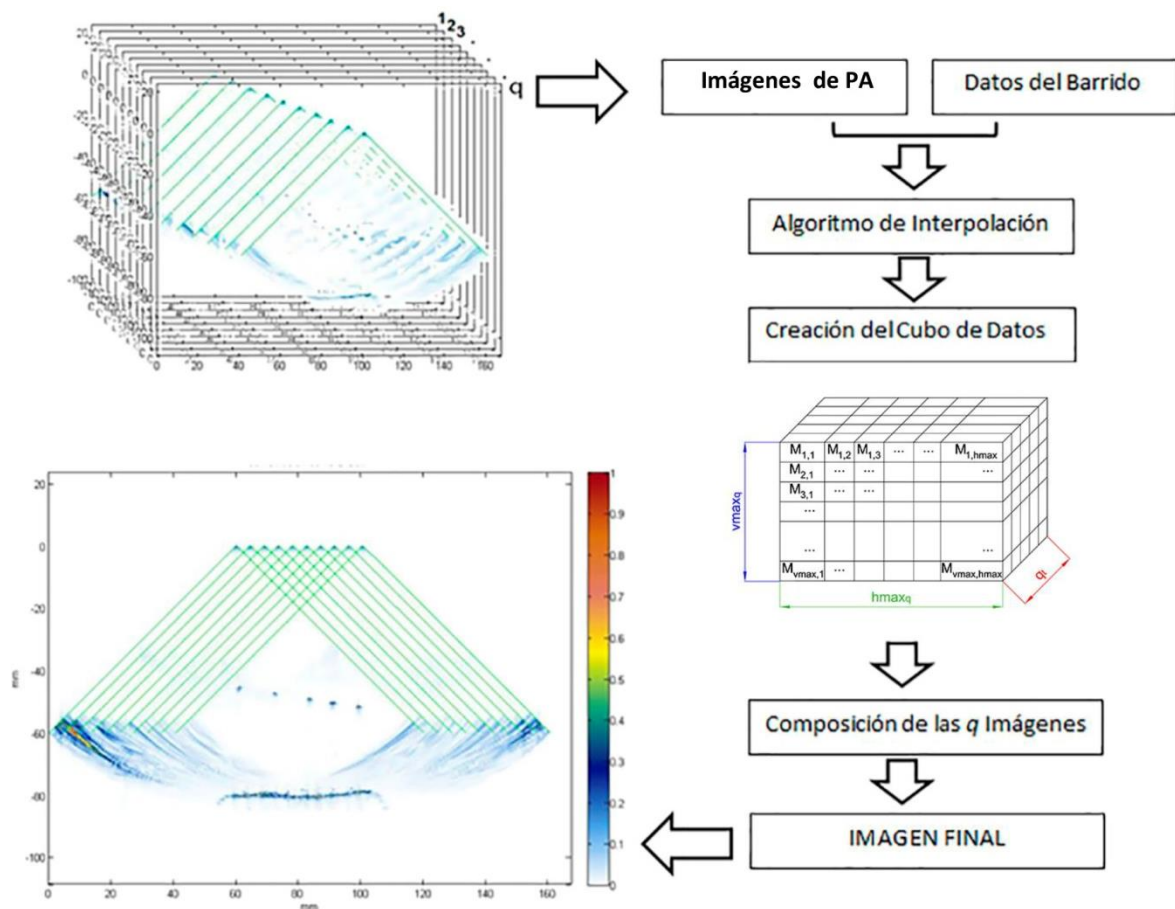


Figura 14. Esquema propuesto para la composición de imágenes ultrasónicas.

2.3.1 Adquisición de imágenes de PA

Las regiones de interés son exploradas adquiriendo imágenes de PA con distintas características de emisión (es decir, tipo de barrido y orientación de la imagen). El conjunto

de imágenes de PA es almacenado en memoria y representan los datos a componer. Para esto, se debe hacer uso de un sistema de PA que permita el acceso a sus datos de apertura.

Una imagen de PA es un conjunto de datos registrado de forma matricial, con dimensiones $m_t \times n_t$, en donde el índice n_t (columnas) indica la cantidad de trazas A-Scans que forman la imagen, y m_t (filas) representa la cantidad de muestras por línea. Así, en la celda (i, j) de la matriz de datos se encuentra el valor de la muestra número j de la línea i (**Figura 15**).

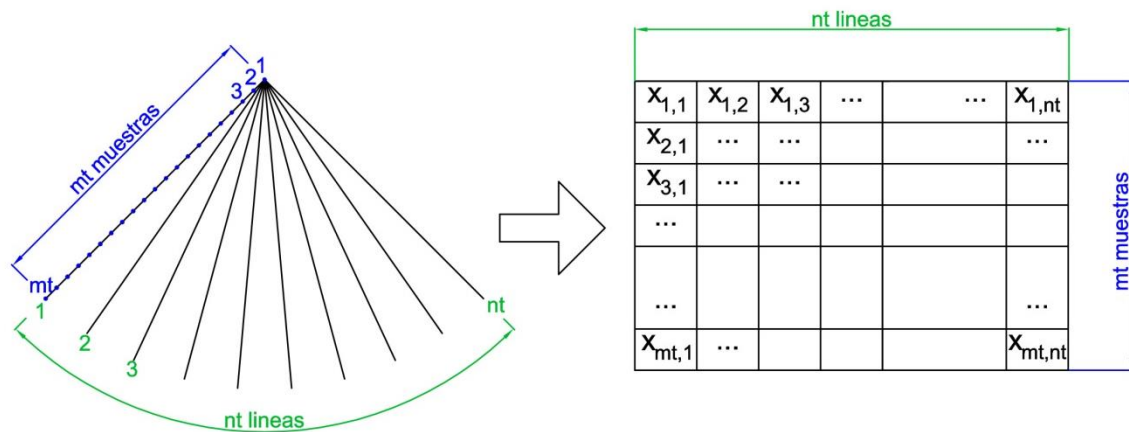


Figura 15. Estructura matricial de una imagen de PA.

Las trazas de A-Scan pueden ser registradas en la forma de onda completa (valores en radio frecuencia o RF) o en envolvente (señal de video o VID). El valor n_t está determinado por el tipo de barrido. En el caso de un barrido lineal (B-Scan), los valores de n_t indican las posiciones de los A-Scans y la separación entre líneas sucesivas, queda definido por el paso que se haya establecido en la configuración del sistema PA. En el caso de una imagen S-Scan, el valor de n_t dependerá del paso y rango angular que se haya establecido en el barrido.

Por otro lado, la cantidad de muestras m_t de las trazas A-Scan estará dado por las características de adquisición y del material bajo ensayo:

$$m_t = f_{sampling} \times t_{final} = f_{sampling} \times \frac{prof_{barrido}}{c_{mat}} \quad (2.1)$$

Donde $f_{sampling}$: frecuencia de muestreo configurada para la captura de datos,

t_{final} : tiempo de vuelo final que establece la profundidad del barrido,

$prof_{barrido}$: profundidad de penetración del barrido.

c_{mat} : velocidad de la onda de ultrasonido (longitudinal o transversal) en el material.

Una vez recuperadas todas las imágenes de la zona de interés, éstas son almacenadas en memoria y organizadas en una matriz tridimensional (denominada en adelante *cubo de datos*) de dimensiones $m_t \times n_t \times q_t$, que surge de agrupar las q_t imágenes PA disponibles para procesar (**Figura 14**). Todo el proceso sugerido en este trabajo fue realizado sobre Matlab[®].

2.3.2 Interpolación Bilineal

Este método que se propone, se basa en la técnica de interpolación que fue desarrollada y validada como forma de conversión de una imagen obtenida de un barrido ultrasónico a una imagen digital [51]. Esta propuesta presenta como ventajas la reducción de errores por “pixel faltante” y la posibilidad de prescindir del uso de un algoritmo de “suavizado” sobre la imagen obtenida. Además, la interpolación bilineal ha demostrado proporcionar mejores resultados que las técnicas de remuestreo digital (como ser el remuestro por vecino más próximo) [52]–[54]. Estas características fueron suficientes para optar por el método de interpolación bilineal para realizar la composición de las imágenes ultrasónicas originales.

Según las características del ensayo se pueden dar dos casos diferentes de interpolación. El primer caso se corresponde con una medición por contacto directo. Entre el transductor y la pieza a ensayar sólo existe una fina capa de acoplante que no genera ecos de interfaz. Así, al considerar un barrido sectorial, se asume que todas las líneas A-Scan parten desde el centro de la apertura (un único punto de emisión). El segundo caso se presenta cuando se utiliza un medio acoplante (puede ser un líquido – ensayo en inmersión - o una zapata de adaptación) entre el transductor y la pieza. En este caso, debe considerarse los fenómenos de refracción del haz ultrasónico que se producen en la interfaz.

2.3.2.1 Interpolación bilineal sin interfaz

Tomando como punto de partida una imagen de barrido angular S-Scan, la matriz original de datos (correspondiente a una imagen de las q_t capturas) debe ser convertida a una grilla de pixeles rectangulares que representa una imagen parcial, que luego será combinada con otras para generar la imagen de salida. Para la conversión de datos se emplea una transformación de coordenadas polares a cartesianas.

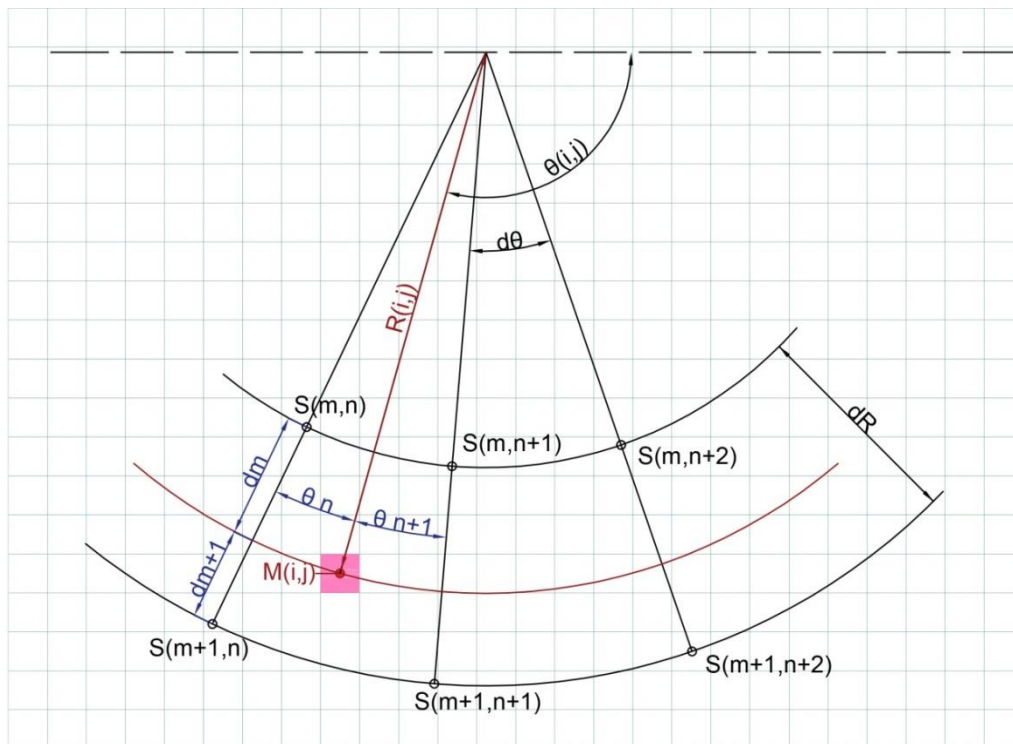


Figura 16. Interpolación bilineal para un barrido angular sin interfaz.

El esquema de interpolación (**Figura 16**) evalúa las posiciones de las muestras S de la imagen adquirida con coordenadas polares (m,n) en el sistema de coordenadas rectangular de la imagen de salida cuyos píxeles M se encuentran en las posiciones (i,j) . Para cada píxel de salida se buscan las 4 muestras más próximas, que poseen un valor de intensidad señal S , y se calculan los pesos P que se aplicarán para interpolar la intensidad M correspondiente al píxel de salida. En concreto, la interpolación bilineal para cada píxel M de la grilla de salida sin interfaz se logra de la siguiente manera:

$$M(i, j) = S(m, n)P(m, n) + S(m, n + 1)P(m, n + 1) + S(m + 1, n)P(m + 1, n) + S(m + 1, n + 1)P(m + 1, n + 1) \quad (2.2)$$

Siendo que cada muestra que interviene en el pixel de salida M , es ponderada e interpolada primero en R y después en θ :

$$P(m, n) = (d_{m+1}/dR)(\theta_{n+1}/d\theta) \quad (2.3)$$

$$P(m, n + 1) = (d_m/dR)(\theta_{n+1}/d) \quad (2.4)$$

$$P(m + 1, n) = (d_{m+1}/dR)(\theta_n/d\theta) \quad (2.5)$$

$$P(m + 1, n + 1) = (d_m/dR)(\theta_n/d\theta) \quad (2.6)$$

donde R es la distancia radial al pixel M , dR es la separación entre muestras de una línea A-Scan, y θ indica la posición angular de cada traza del barrido.

2.3.2.2 Interpolación bilineal con interfaz

Esta situación es muy habitual en los END industriales. Por lo general se utilizan zapatas para producir un cambio en el modo de propagación del haz, proteger al transductor del desgaste, o bien cuando se realizan ensayos en condiciones de inmersión (por ejemplo, en agua, aceite, etc.) para adaptar la superficie del sensor a la geometría de la pieza. En estos escenarios de inspección se presenta una interfaz entre el medio de acople y el de la pieza, y es en la frontera de estos materiales en donde se produce un cambio en la velocidad de propagación, con la consecuente reflexión y refracción del haz emitido.

La interfaz hace que las líneas de A-Scan de la imagen adquirida ya no tengan un único punto de origen como lo analizado para un barrido angular en 2.3.2.1. Por el contrario, el barrido se compone de líneas rectas (generatriz) orientadas con una determinada dirección angular. Por lo tanto, el proceso de ubicación y ponderación de los pesos de las muestras más próximas se vuelve más complejo.

Para demostrar el camino del punto de salida de las líneas A-Scan se puede estimar el ángulo de refracción de tres casos según la ley de Snell. Como ejemplo se considera un escenario común dentro de los END, en donde se utiliza un array montado sobre una zapata de acrílico

(Perspex[®]) en contacto con una pieza de acero. En la **Tabla 4** (Anexo) se presentan las velocidades de propagación de onda longitudinal para cada material:

$$1) \text{ Acrílico } c_{l1} = 2,73 \text{ [mm/}\mu\text{s]}$$

$$2) \text{ Acero 1020 } c_{l2} = 5,89 \text{ [mm/}\mu\text{s]}$$

Haciendo uso del *trazado de rayos* y asumiendo que la generatriz del haz dentro de la zapata se origina en el punto medio de la apertura y considerando solo tres líneas de un barrido angular, con ángulos de incidencia de 10°, 15° y 20° respecto de la interfaz. Al aplicar la ley de Snell ecuación (1.8) se obtiene:

$$I) \alpha_{2I} = \text{sen}^{-1} \left(\frac{\text{sen}(10^\circ) \times 5,89}{2,73} \right) = 22^\circ$$

$$II) \alpha_{2I} = \text{sen}^{-1} \left(\frac{\text{sen}(15^\circ) \times 5,89}{2,73} \right) = 34^\circ$$

$$III) \alpha_{2III} = \text{sen}^{-1} \left(\frac{\text{sen}(20^\circ) \times 5,89}{2,73} \right) = 48^\circ$$

Los diferentes ángulos refractados en el material hacen que los puntos en la interfaz sean diferentes. Gráficamente en la **Figura 17** se observan que los puntos de intersección de las líneas de barrido son diferentes, incluso asumiendo una interfaz perfectamente plana.

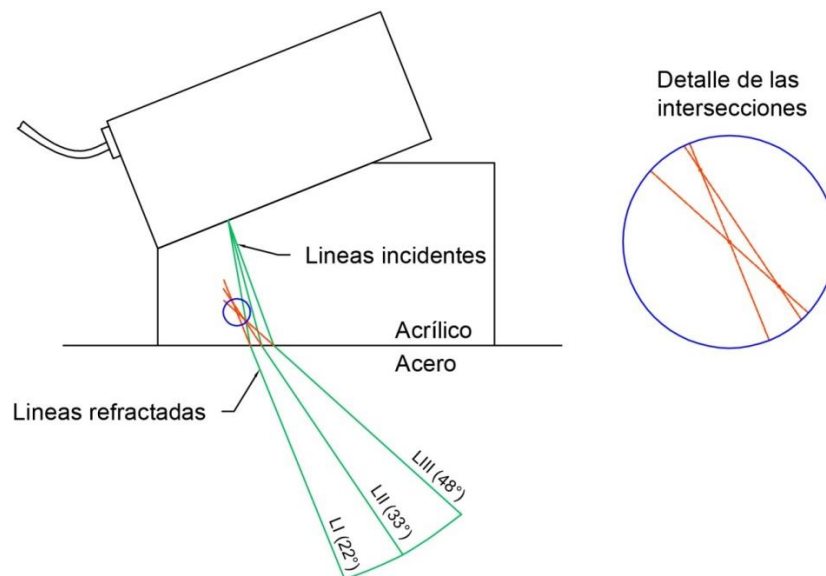


Figura 17. Refracción de las líneas A-Scan empleando el método de trazado de rayos.

Así, para realizar la interpolación bilineal con interfaz, primero es necesario determinar la ubicación de las trazas A-Scan sobre la grilla rectangular de salida. Por lo tanto, es necesario encontrar los puntos de entrada en el material E_i , que por lo general se determinan discretizando finamente la interfaz para obtener una buena resolución temporal y luego aplicando el principio de Fermat. Sin embargo, esta problemática se abordó utilizando un nuevo método denominado de “AutoEnfoque”, que se basa en detectar la interfaz con elevada resolución, mediante una serie limitada de disparos con un subconjunto de elementos del array [55]. Una vez estimada la interfaz, se calcula un “array virtual equivalente” que opera en el medio del material de la pieza, evitando así los complejos cálculos derivados de la refracción del sonido [56]. La operación en un único medio permite calcular los retardos de focalización dinámica en tiempo real en el propio hardware de control del equipo de ultrasonidos, mediante circuitos que sólo requieren el cálculo de unos pocos parámetros de inicialización [57]. Con todas estas herramientas, además de conseguir un método capaz de enfocar una imagen ultrasónica sobre cualquier interfaz arbitraria en menos de 1 segundo, se pueden obtener los puntos de entrada en el material.

Una vez encontrados puntos de entrada E_i con coordenadas $\{x_e, z_e\}$ se calculan las posiciones de las muestras iniciales expresándolas en el sistema de coordenadas adoptado en la grilla de pixeles de la siguiente forma:

$$xI_n = x_{e_n} + R_i \times \text{sen}(\theta) \quad (2.7)$$

$$zI_n = z_{e_n} - R_i \times \text{cos}(\theta) \quad (2.8)$$

Donde $\{x_e, z_e\}$ son las coordenadas de los puntos de entrada E_i de cada traza A-Scan en el material, mientras que R_i es el rango inicial y θ es el ángulo de cada línea del barrido medido con respecto a la normal de la superficie del material (se adopta la convención de ángulos crecientes en el sentido antihorario). Luego, la posición “ F_i ” de la última muestra de cada A-Scan en la grilla de pixeles de salida se encuentra como:

$$xF_n = xI_n + dR \times (m_t - 1) \times \text{sen}(\theta) \quad (2.9)$$

$$zF_n = zI_n + dR \times (m_t - 1) \times \text{cos}(\theta) \quad (2.10)$$

Donde dR es la separación entre muestras de una línea A-Scan y m_t es el número de muestras por línea. Finalmente, los límites de la grilla de pixeles necesarios para representar la imagen de PA estará dada por:

$$\text{Límite izquierdo: } X_I = \min(xI, xF) \quad (2.11)$$

$$\text{Límite derecho: } X_D = \max(xI, xF) \quad (2.12)$$

$$\text{Límite superior: } Z_S = \max(zI, zF) \quad (2.13)$$

$$\text{Límite inferior: } Z_I = \min(zI, zF) \quad (2.14)$$

La **Figura 18** muestra de manera simplificada la posición de la grilla de pixeles de salida en donde se realizará la interpolación de datos para el caso de una interfaz irregular. La zona a representar es la que se encuentra dentro de los cuadriláteros definidos por los límites X_I , X_D , Z_S y Z_I , que contienen a todos los puntos del barrido.

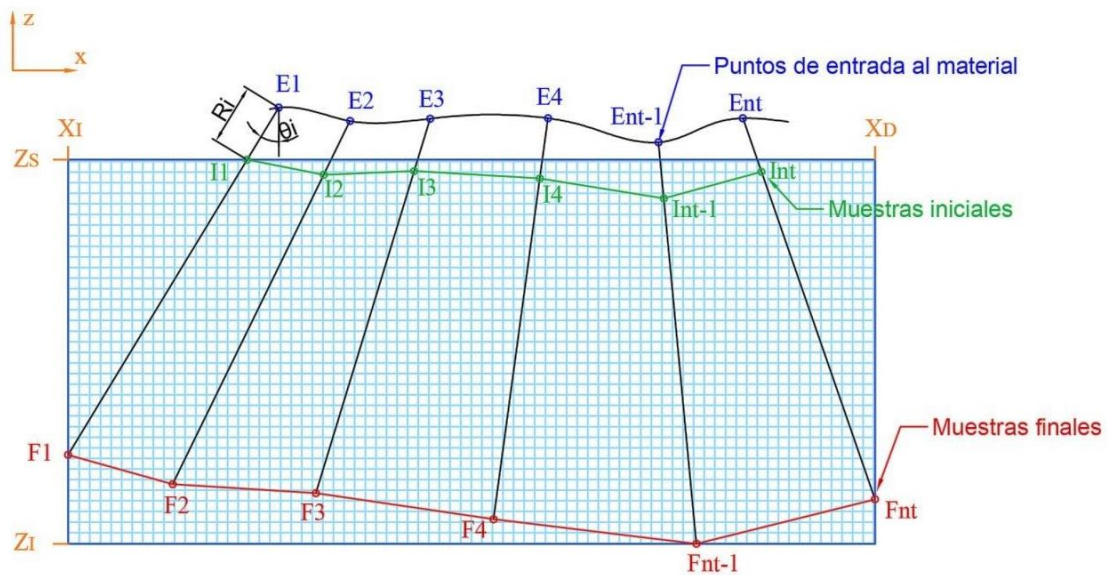


Figura 18. Grilla de pixeles para un barrido con interfaz

Luego se debe determinar si cada píxel pertenece o no a la zona que se quiere representar y, en tal caso, entre que líneas del barrido se encuentra. Para esto, se establecen áreas definidas por los cuadriláteros encerrados entre cada par de líneas consecutivas del barrido y las rectas que unen sus extremos.

La **Figura 19** muestra la forma de un cuadrilátero que contiene a todos los píxeles comprendidos por esa pareja de líneas y que serán interpolados. Entonces, el problema se reduce en encontrar el cuadrilátero que contiene a cada uno de los píxeles M de coordenadas (vM, hM) de la grilla (**Figura 20**).

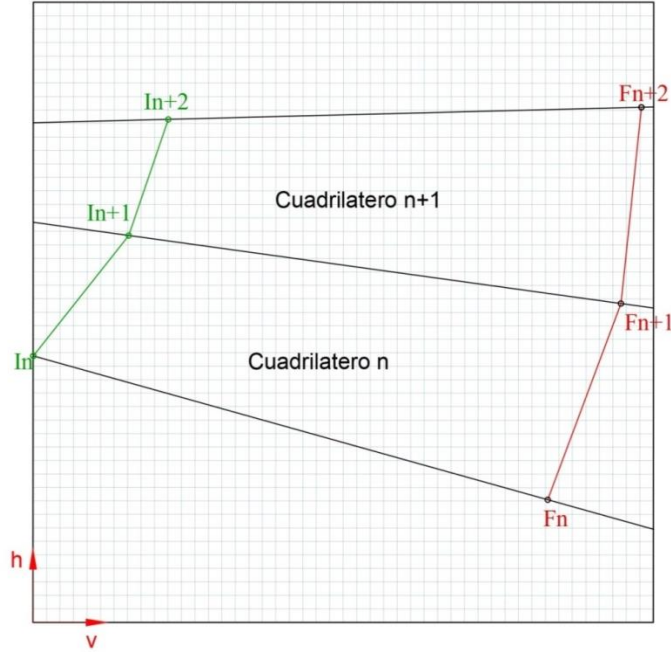


Figura 19 Grilla de píxeles y cuadrilátero formado por las líneas de barrido.

En primer lugar, se deben encontrar las intersecciones de la recta vertical que pasa por M con todas las líneas del barrido, para esto, se definen las ecuaciones correspondientes a las generatrices de las trazas A-Scan de la siguiente forma:

$$h = a_n \times v + b_n \quad (2.15)$$

Donde los coeficientes a y b se calculan previamente para cada línea n , en el sistema de coordenadas de la imagen (h, v) como:

$$a_n = \frac{hF_n - hI_n}{vF_n - vI_n} \quad (2.16)$$

$$b_n = hI_n - a_n \times vI_n \quad (2.17)$$

Donde (hI_n, vI_n) y (hF_n, vF_n) corresponden a la ubicación de las muestras iniciales y finales de cada línea de barrido, expresadas en las coordenadas de la grilla de pixeles, calculadas según:

$$hI_n = \frac{(xI_n - X_I)}{Esc} \quad (2.18)$$

$$vI_n = -\frac{(zI_n - Z_S)}{Esc} \quad (2.19)$$

$$hF_n = \frac{(xF_n - X_I)}{Esc} \quad (2.20)$$

$$vF_n = -\frac{(zF_n - Z_S)}{Esc} \quad (2.21)$$

Donde el valor Esc es la escala del gráfico en [mm/pixeles] que, generalmente se establece en función de la longitud de onda (λ), determinada a partir de la velocidad de propagación del sonido en el material y de la frecuencia del transductor utilizado.

$$\lambda = \frac{c_{material}}{f_{transductor}} \quad (2.22)$$

También serán necesarias las ecuaciones de las rectas que unen los puntos iniciales I_n con I_{n+1} y los puntos finales F_n con F_{n+1} , puesto que determinan los límites de cada uno de los cuadriláteros comprendidos en el barrido. Así, las rectas que unen las muestras iniciales se determinan como:

$$aI_n = \frac{hI_{n+1} - hI_n}{vI_{n+1} - vI_n} \quad (2.23)$$

$$bI_n = hI_{n+1} - aI_n \times vI_n \quad (2.24)$$

Y las rectas que unen las muestras finales, se determinan como:

$$aF_n = \frac{hF_{n+1} - hF_n}{vF_{n+1} - vF_n} \quad (2.25)$$

$$bF_n = hF_{n+1} - aF_n \times vF_n \quad (2.26)$$

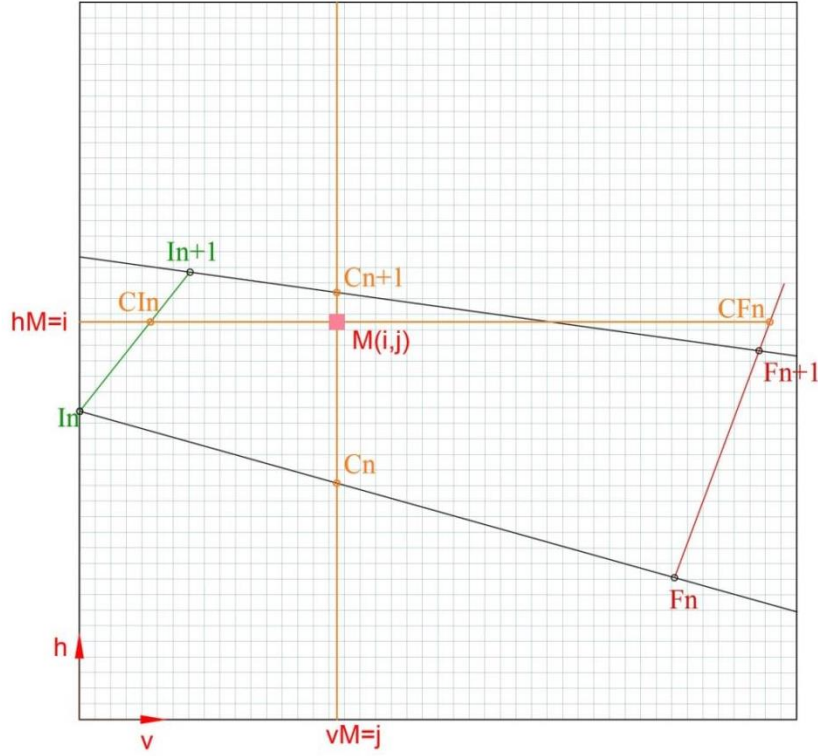


Figura 20. Ubicación del píxel M en la zona a representar.

Luego se busca el índice n que cumpla con:

$$hC_n < hM \leq hC_{n+1} \quad (2.27)$$

Donde el índice n representa la línea inmediatamente por debajo del píxel. Si $hM < hC_1$ o $hM > hC_{nt}$, entonces el píxel de la grilla está fuera de la zona de barrido. Para que el píxel esté dentro del barrido, también se debe cumplir que su posición horizontal esté entre los puntos CI y CF (corte con las rectas que unen los puntos I_n con I_{n+1} y F_n con F_{n+1} respectivamente):

$$vCI_n = \frac{hM - bI_n}{aI_n} \quad (2.28)$$

$$vCF_n = \frac{hM - bF_n}{aF_n} \quad (2.29)$$

$$vM \geq vCI_n \text{ y } vM \leq vCF_n \quad (2.30)$$

Luego, para cada uno de los M pixeles de la grilla que están comprendidos en cada cuadrilátero formado por dos líneas auxiliares contiguas, se les debe calcular la posición y el peso de cada una de las cuatro muestras más próximas, valiéndose para esto del uso de la bisectriz y de una recta auxiliar que contenga al pixel de salida y que sea perpendicular a la bisectriz (**Figura 21**).

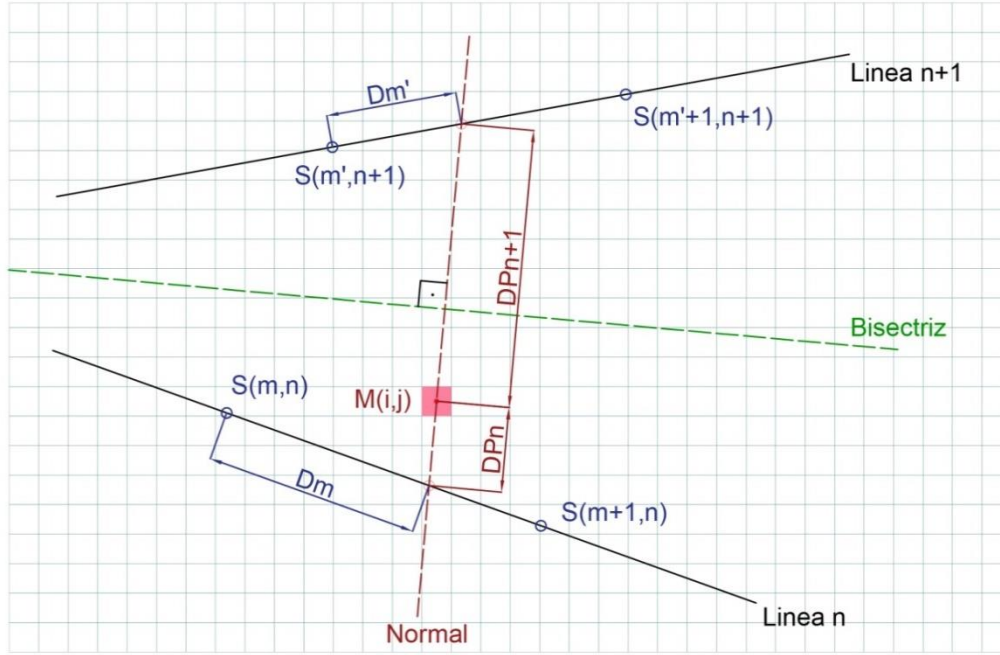


Figura 21. Ponderación de muestras para la interpolación bilineal con barrido angular e interfaz.

Finalmente, la intensidad de cada pixel se calcula de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 M(i,j) = & S(m,n)P(m,n) + S(m+1,n)P(m+1,n) + \\
 & +S(m',n+1)P(m',n+1) + \\
 & +S(m'+1,n+1)P(m'+1,n+1)
 \end{aligned}
 \quad (2.31)$$

Siendo S el valor de la señal de cada muestra y P la ponderación correspondiente. Los pesos son calculados de la siguiente forma:

$$P(m,n) = \left(\frac{DP_{n+1}}{DP_n + DP_{n+1}} \right) \left(\frac{dR - Dm}{dR} \right)
 \quad (2.32)$$

$$P(m + 1, n) = \left(\frac{DP_{n+1}}{DP_n + DP_{n+1}} \right) \left(\frac{Dm}{dR} \right) \quad (2.33)$$

$$P(m', n + 1) = \left(\frac{DP_n}{DP_n + DP_{n+1}} \right) \left(\frac{dR - Dm'}{dR} \right) \quad (2.34)$$

$$P(m' + 1, n + 1) = \left(\frac{DP_n}{DP_n + DP_{n+1}} \right) \left(\frac{Dm'}{dR} \right) \quad (2.35)$$

En donde dR es la separación entre dos muestras sucesivas de un A-Scan, (Dm , Dm') son las separaciones entre las muestras (m , m') y la intersección de la normal a la bisectriz con las líneas (n , $n + 1$), y (DP_n , DP_{n+1}) son las distancias entre las líneas de barrido y el pixel de salida M , medidas sobre la normal a la bisectriz.

2.3.3 Creación del cubo de datos

Después de realizar la interpolación bilineal para cada una de las q_t imágenes, se obtiene por cada una de ellas una matriz de pixeles de dimensiones $vmax_q \times hmax_q$, que expresan el número de pixeles en las direcciones horizontal y vertical de la imagen original interpolada sobre una grilla rectangular. Estos valores se calculan de la siguiente forma:

$$hmax_q = \frac{(X_D - X_I)_q}{Esc} \quad (2.36)$$

$$vmax_q = \frac{(Z_S - Z_I)_q}{Esc} \quad (2.37)$$

Donde X_D , X_I , Z_S , Z_I se calculan mediante las ecuaciones (2.11 – 2.14) y Esc es el factor de escala del gráfico expresado en [mm/pixeles]. Por lo tanto, si durante el ensayo se adquieren q_t imágenes de PA, se genera un cubo de datos de tamaño $vmax_q \times hmax_q \times q_t$ que contiene a todas las imágenes interpoladas (**Figura 22**).

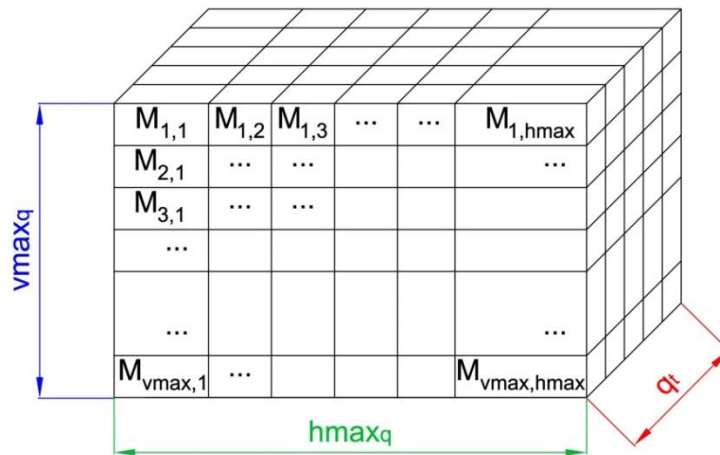


Figura 22. Matriz tridimensional de píxeles (cubo de datos).

2.3.4 Suma coherente de las imágenes con diversidad espacial

Este paso tiene como objetivo no sólo ampliar el campo de visión del ensayo sino también detectar y ubicar defectos de naturaleza especular sin importar su orientación. En la **Figura 23** se ejemplifica el caso de un material que contiene dos defectos planos con diferentes orientaciones. En el esquema, el “Defecto 1” tiene una orientación desfavorable, y en las primeras q_t imágenes que lo contienen solo se obtendrá la información de las señales de difracción que se producen en los extremos, y de muy poca intensidad. Sin embargo, en la “Imagen de salida” este defecto será detectado con mayor claridad puesto que se aprovechará la información espacial aportada por q barridos que la contienen. Por otro lado, el “Defecto 2” que es detectado solo por las imágenes 1 y 2, en la imagen compuesta no será detectado con facilidad puesto que se encuentra en una región donde se superponen pocos barridos.

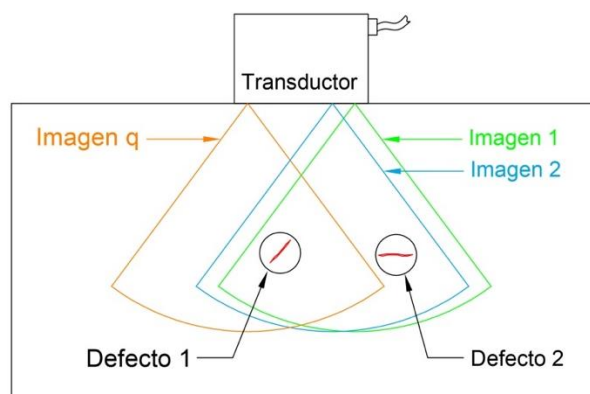


Figura 23. Diversidad espacial obtenida de “ q ” barridos.

Cada imagen de PA adquirida es interpolada, según el escenario de inspección, sobre una grilla de pixeles equivalente al área de barrido. El tamaño de la grilla queda definido por los límites máximos del barrido y representan espacialmente una parte de la exploración de la zona de interés. Luego, para representar toda la información adquirida, cada una de estas q_t imágenes interpoladas debe ser ubicada sobre una grilla espacial de mayor tamaño que contiene a toda la zona de interés. Entonces, sobre esta grilla “ampliada” se realiza la suma coherente de la información, respetando las posiciones de cada una de las imágenes originales, formando la imagen de salida final (**Figura 24**). Las dimensiones en pixeles de la grilla que contiene a toda la zona de interés será:

$$hmax_t = \frac{\max \{(X_D)_q\} - \min \{(X_I)_q\}}{Esc} \quad (2.38)$$

$$vmax_t = \frac{\max \{(Z_S)_q\} - \min \{(Z_I)_q\}}{Esc} \quad (2.39)$$

Por lo tanto, sobre la imagen de salida (grilla ampliada) existirán zonas con un elevado grado de solapamiento de información y otras en donde sólo unos pocos barridos se superpondrán. Entonces, en las regiones donde los pixeles de cada imagen se superponen con otros por el solapamiento de puntos, requerirán de un método de combinación adecuado para no perder resolución o no estropear la relación señal-ruido en la imagen de salida.

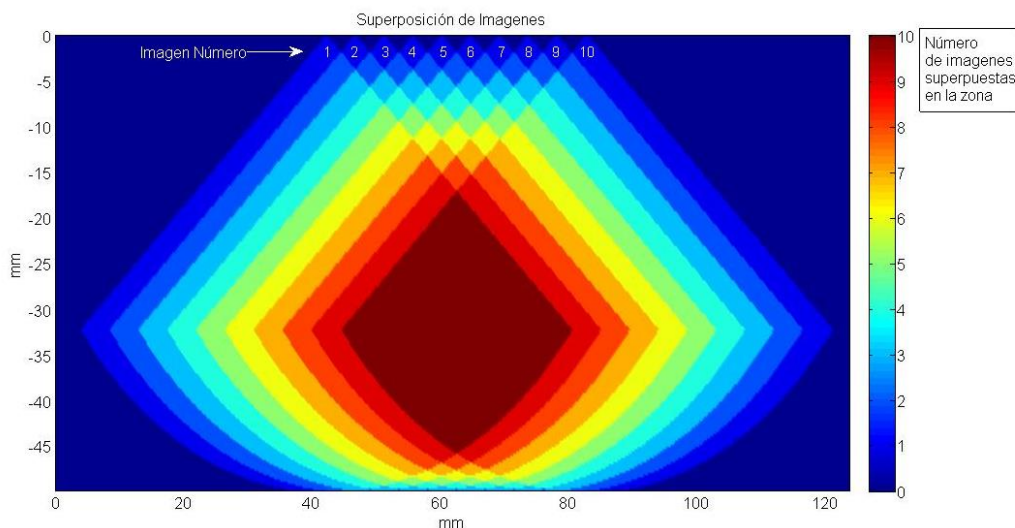


Figura 24. Grilla ampliada y nivel de superposición para una composición de 10 imágenes S-Scan

2.3.5 Búsqueda del método de combinación

La imagen de salida contiene pixeles cuya amplitud final es establecida por la información espacial que se obtiene de dos o más imágenes que lo contuvieron. Existen diversas formas de combinar varios valores; sin embargo, se compararon tres procesos: primero tomando el valor medio de todas las amplitudes que contribuyen al pixel de la imagen de salida (promediado). Segundo, asignando al pixel de salida el mínimo valor de todas las amplitudes, y como tercera opción, se evaluó utilizando la mediana como método de combinación.

La comparación de los tres métodos propuestos se realizó sobre una imagen de salida compuesta por la combinación de 6 imágenes S-Scan con un rango angular entre $\pm 45^\circ$, separados en sus orígenes unos 5 mm. Sobre la imagen de salida se analizó la función de dispersión de un punto (patrón lateral) que se obtiene de un reflector de 1.5 mm de diámetro, inmerso en agua (sin interfaz) y ubicado a 61 mm respecto el frente del array.

En el gráfico resultante mostrado en la **Figura 25** se observa que el promediado de las amplitudes presenta una buena respuesta, no obstante, la resolución lateral empeora respecto a los métodos de mediana o mínimos. Por otra parte, la elección de los valores mínimos presenta una leve reducción en el nivel de ruido alrededor del defecto puntual, en congruencia con lo analizado por Robinson y Knight en [42]. Sin embargo al analizar estrictamente la relación SNR el promediado ofrece una mejor respuesta. Finalmente se observó que la mediana resulta menos sensible a los reflectores pequeños como es en este caso. Por lo tanto, para combinar los pixeles que se superponen en la imagen de salida se seleccionó el promedio de la información por ser una solución de compromiso entre las técnicas evaluadas.

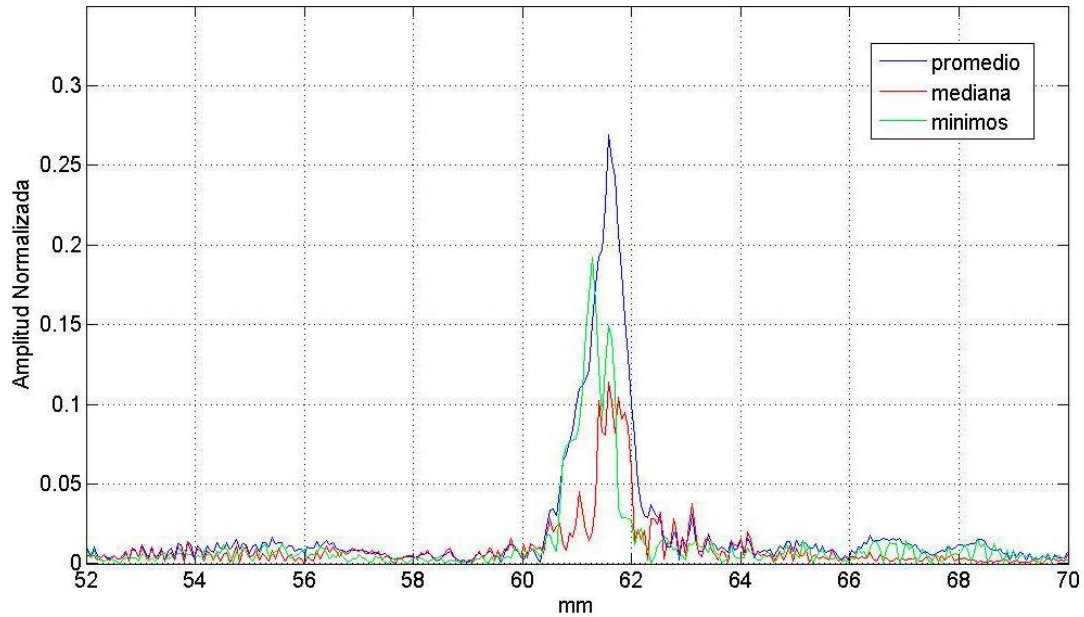


Figura 25. Patrones laterales obtenidos de un reflector puntual empleando distintos métodos de combinación.

2.3.6 Número óptimo de imágenes

Resulta de interés establecer la cantidad óptima de imágenes que se van a combinar para no extender demasiado el tiempo de cómputo del algoritmo de interpolación y lograr resultados aceptables. Para esto, se utilizó la posición del punto medio de cada apertura activa utilizada para capturar cada imagen de entrada (punto de emisión) como parámetro de control, ya que los resultados de la composición dependen no solamente del número de imágenes a componer sino también de la diversidad espacial de las mismas (varía con el punto de emisión y los ángulos de barrido). La separación entre las aperturas, expresadas en mm o en número pitch (separación entre dos elementos del array), se fue modificando para observar la imagen que se compone con barridos sectoriales comprendidos entre $\pm 45^\circ$. Analizando el patrón lateral de 5 reflectores (**Figura 26**) de 1,5 mm de diámetro inmerso en agua (sin interfaz), se pueden obtener distintas curvas con el porcentaje de reflectores resueltos (es decir cuya señal apreciable expresada en amplitud normalizada sea mayor a 35%). En este caso, estas curvas se calcularon a partir de una composición de N imágenes S-Scans, separadas por 1, 2, 3, 4.5 y 6 mm (**Figura 27**). Por tanto, conocer la separación entre los puntos de emisión resulta de gran interés, pues resulta mucho más eficiente componer la menor cantidad de imágenes con una mayor separación para agregar una mayor diversidad espacial y disminuir el costo

computacional. Se observa que componiendo 8 imágenes separadas a 4.5 ó 6 mm, ya se logran identificar todos los reflectores (es decir el 100% de las referencias).

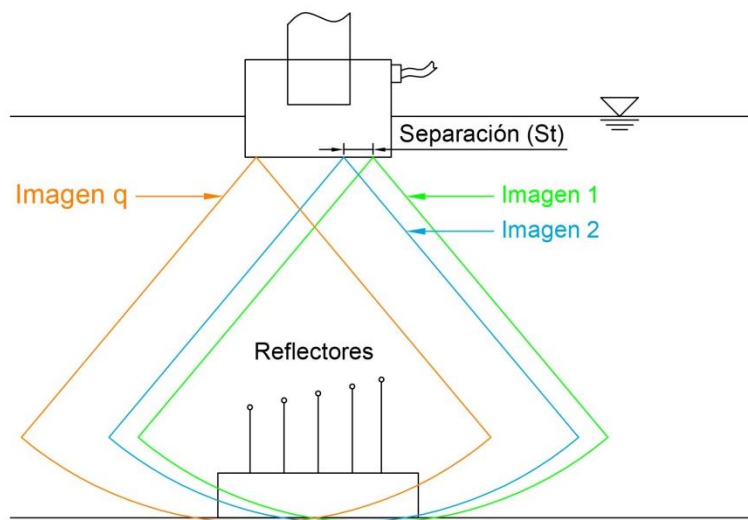


Figura 26. Esquema del ensayo de búsqueda del número óptimo de imágenes.

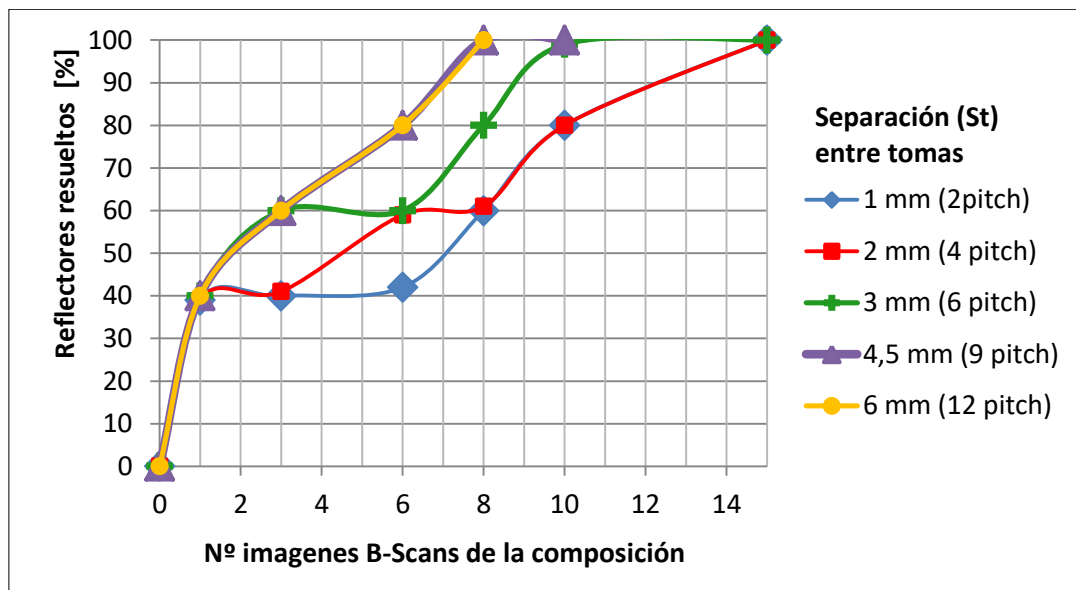


Figura 27. Efecto de la separación entre imágenes y el número de tomas B-Scan de la composición en la respuesta que se obtienen de 5 reflectores.

3. Resultados

Las ecuaciones (2.2) y (2.31) que establecen la interpolación bilineal (con y sin interfaz) fueron implementadas en Matlab para su verificación. Para cada imagen PA de entrada, el algoritmo entrega una grilla de pixeles que contiene el barrido y es colocada en el cubo de datos. Los pixeles interpolados que se solapan con otros en la imagen de salida (grilla ampliada) son combinados tomando el promedio de todas las amplitudes que le contribuyen, siguiendo con los lineamientos analizados en las secciones 2.3.2, 2.3.3 y 2.3.4.

3.1 Adquisición de imágenes de PA

Todas las experimentaciones de esta propuesta de trabajo se realizaron utilizando un sistema de Phased Array SITAU-311 311 ([DASEL](#), España) de 32 canales activos, multiplexados a 128 elementos, operando con un array de 5 MHz con un ancho de banda del 60%, 128 elementos y con una separación entre elementos (*pitch*) de 0.5 mm fabricado por [Imasonic](#), Francia (**Figura 28**).

El instrumental fue configurado para obtener las imágenes de PA con el barrido electrónico más adecuado para cubrir parte de la región de interés, desde distintas posiciones y direcciones angulares, a fin de generar una imagen que contenga una información espacial coherente de todas las capturas.

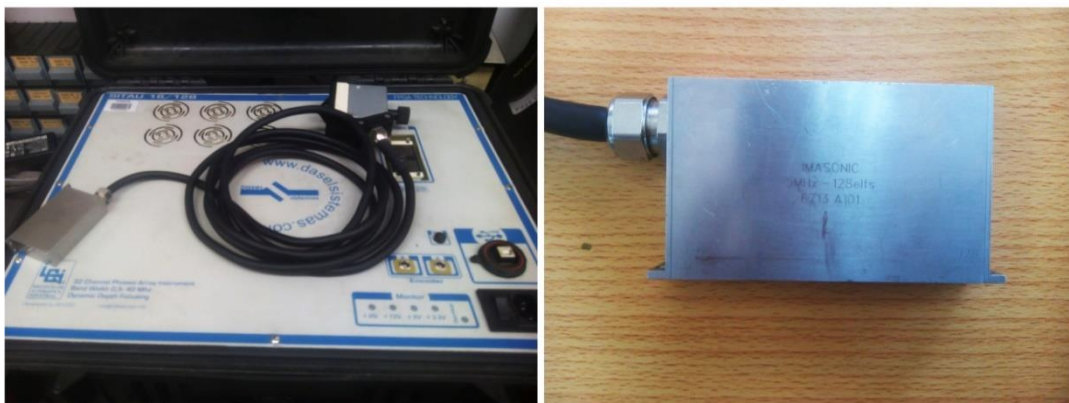


Figura 28. Sistema SITAU (izquierda) y transductor de Phased Array (derecha).

El sistema SITAU permite generar las imágenes de PA en los formatos tradicionales (lineal y angular). El conjunto de imágenes de PA de la zona de interés es almacenado en memoria y representan los datos a componer final. El sistema PA permite acceder a sus datos de apertura, además de proporcionar la siguiente información:

- Parámetros de configuración (archivo “**cfg**”): contiene todos los datos del ensayo, tal como el número de canales, número de elementos activos, velocidad del material, ganancia, frecuencia, etc., así como las características geométricas de la pieza y de la adquisición (profundidad del barrido, posición de los elementos activos en emisión dentro del array, posiciones de cada una de las líneas de barrido, ángulos de inicio y fin del barrido sectorial, etc.).
- Imagen de PA (archivo “**img**”): la imagen ultrasónica digitalizada está organizada en un formato matricial de datos, de dimensiones $m_t \times n_t$, tal como se indica en la **Figura 15**.

3.2 Ensayos sin interfaz

3.2.1 Reflectores en inmersión

En el caso de la interpolación sin interfaz, se utilizó agua desgasificada como medio de propagación, en donde se colocaron 5 reflectores esféricos de 1 mm de diámetro, de igual manera que en el ensayo de búsqueda del número óptimo de imágenes (**Figura 29**). El ensayo en inmersión se llevó a cabo en una cuba modelo Sonix (USA), con sistema de posicionamiento xyz automatizado y diseñado para aplicaciones de ultrasonidos (**Figura 30**). Para este ensayo, la longitud de onda λ (ver ecuación (2.22)) en agua es (utilizando el valor de la velocidad de propagación de la **Tabla 4**):

$$\lambda = \frac{1.473 [mm/\mu s]}{5 [MHz]} = 0,295 [mm]$$

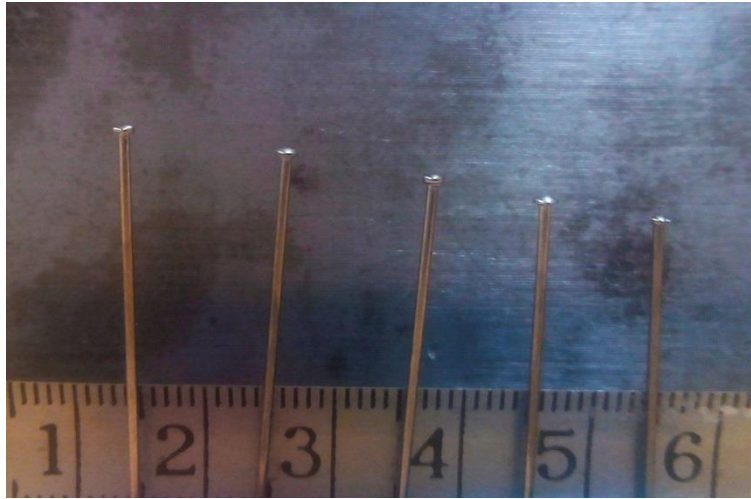


Figura 29. Arreglo para obtener reflectores esféricos a diferentes profundidades.

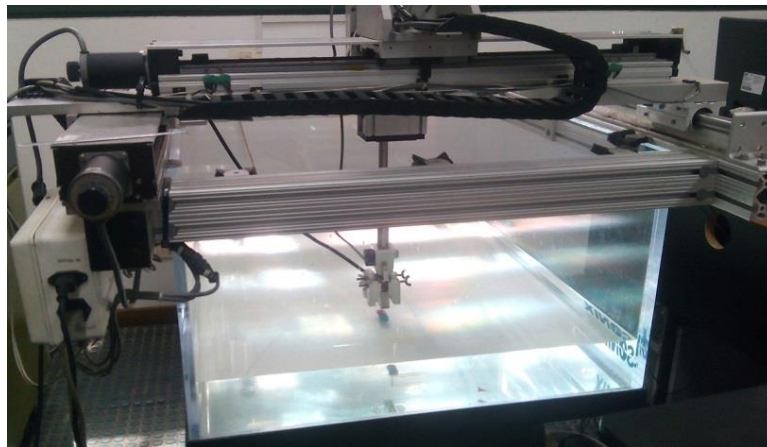


Figura 30. Transductor y probeta en condiciones de inmersión dentro de la cuba de agua desgasificada.

Las imágenes de entrada fueron realizadas empleando una apertura activa de 32 elementos, utilizando un barrido sectorial comprendido entre $\pm 45^\circ$. El centro de la apertura activa de cada imagen de PA se fue desplazando cada 0.5mm (distancia equivalente a 1 pitch del array) para obtener distintos puntos de emisión. La imagen S-Scan que se obtiene normalmente sin focalización dinámica, presentará mejor resolución para uno u otro reflector dependiendo de la ubicación del foco. Tanto es así, que ubicando el foco en una posición intermedia (40 mm) a todos los reflectores, los que se encuentran más próximos al transductor no terminan siendo bien resueltos (**Figura 31**).

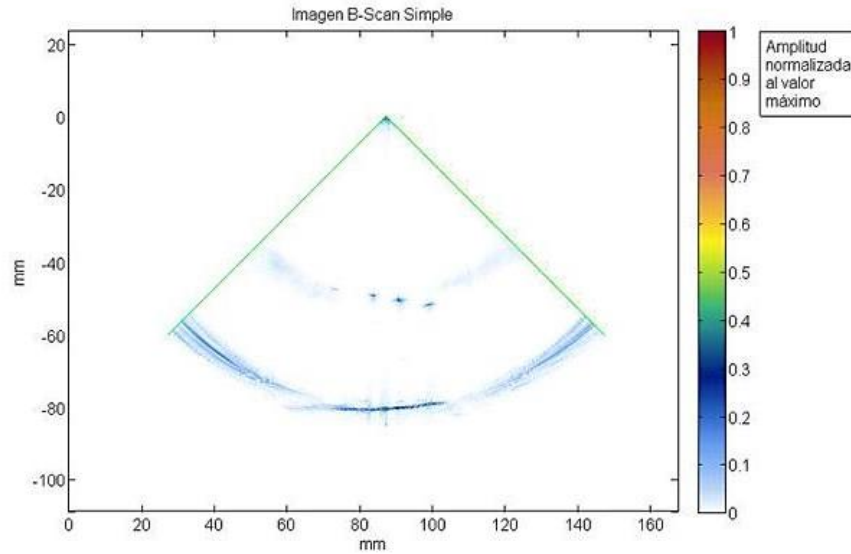


Figura 31. Imagen S-Scan con un barrido entre $\pm 45^\circ$ con una apertura activa de 32 elementos.

Considerando solo diez imágenes S-Scan separadas a 4.5 mm (distancia equivalente a 9 pitch) entre los centros de las aperturas activas, se puede observar que, dependiendo de la posición de adquisición, algunos reflectores se ven más favorecidos que otros. Entonces, no es posible resolver simultáneamente los cinco reflectores en una única captura (**Figura 32**).

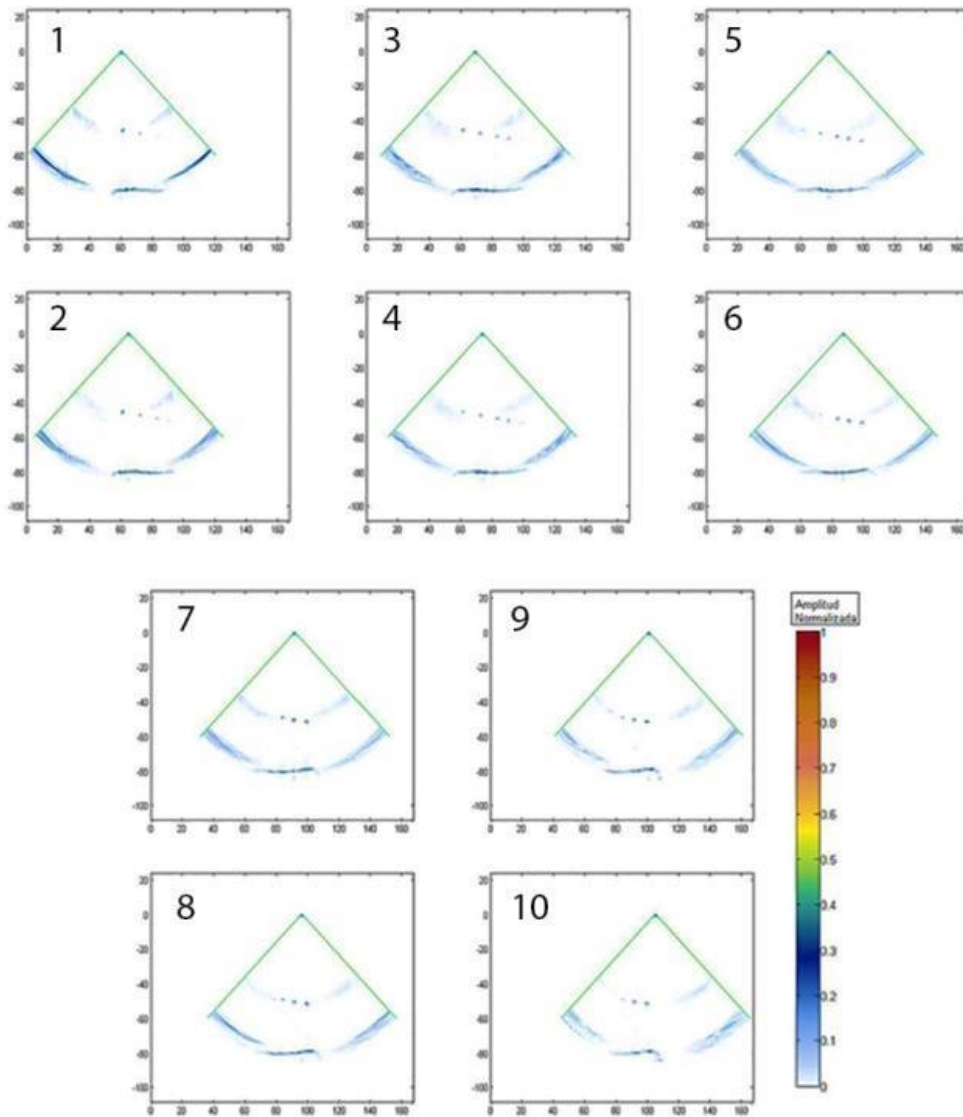


Figura 32. Imágenes S-Scan obtenidas al desplazar la posición de la apertura en 4.5 mm hacia la derecha.

Luego, de interpolar las 10 imágenes mediante el algoritmo propuesto y componer los píxeles de salida empleando el promedio de sus intensidades, se obtiene una imagen final que presenta una mejor SNR, mayor contraste que las capturas individuales, y en donde los 5 reflectores quedan bien definidos (**Figura 33**).

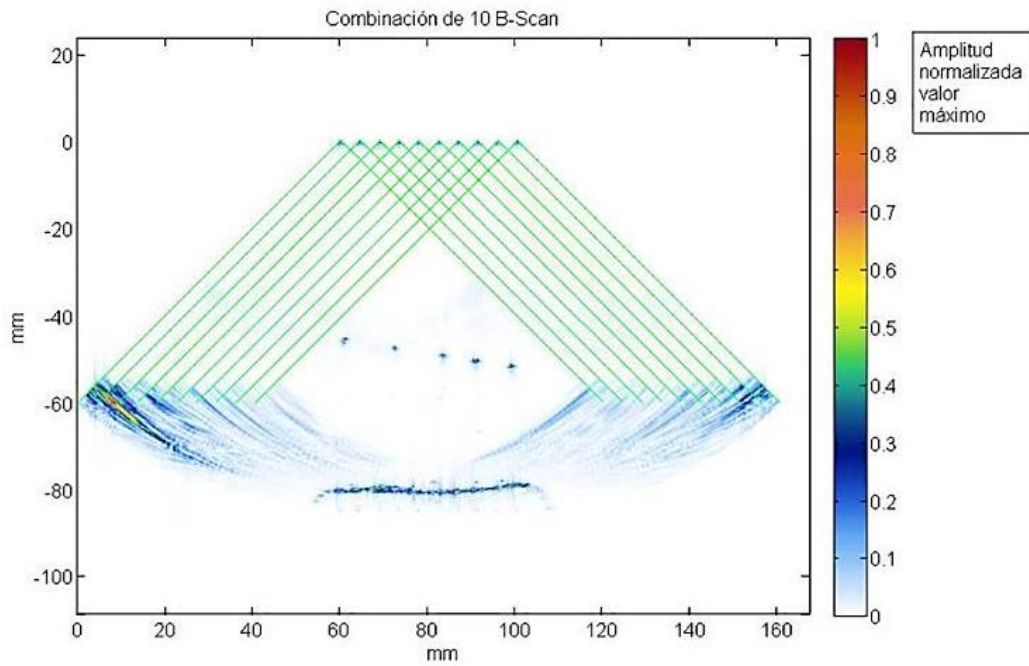


Figura 33. Imagen compuesta por la suma coherente de las 10 imágenes capturadas cada 4.5 mm. Cada imagen individual (limitada con líneas verdes) aporta información parcial de la imagen de salida.

En una imagen con más detalles de la zona de los cuatro reflectores localizados por el barrido de la **Figura 31** (imagen de PA convencional), en comparación con la imagen compuesta, se puede observar la mejora en la resolución lateral que se obtiene con el método propuesto, puesto que los defectos se describen con mayor definición (**Figura 34**).

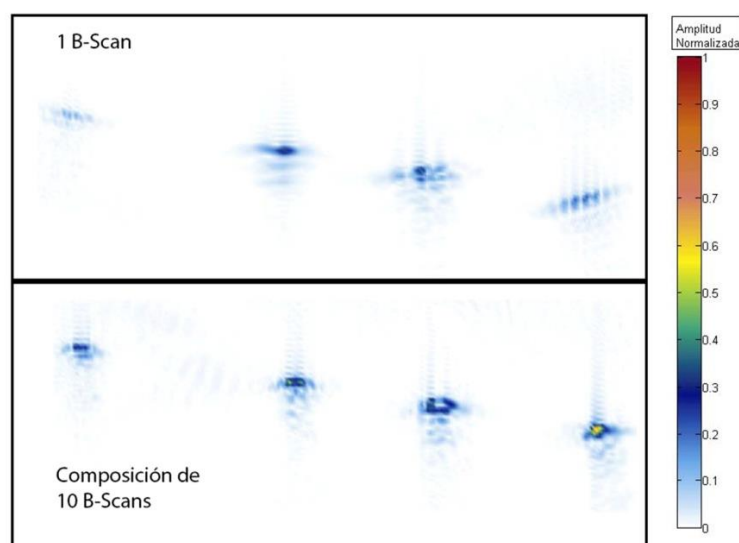


Figura 34. Detalle de la comparación de los reflectores puntuales en la imagen PA mostrada en la Figura 31, con la imagen compuesta por 10 B-Scans.

En el ámbito de los END por ultrasonido es común utilizar los decibelios como unidad de medida relativa, por ejemplo, se puede comparar la amplitud de señal de un punto A en relación con la señal de máxima amplitud A_{max} . Por lo tanto, el uso de una paleta de colores expresada en decibelios tiene la ventaja de producir un mayor contraste y un efecto de reducción aparente del ruido al ser una relación logarítmica.

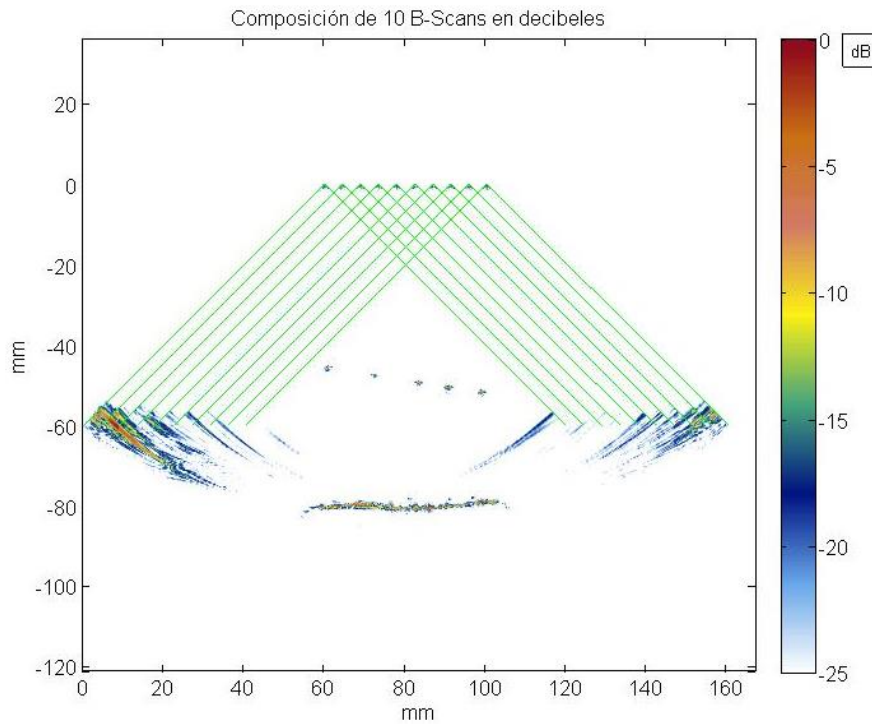


Figura 35. Imagen compuesta por la suma coherente de las 10 imágenes capturadas cada 4.5 mm expresada con un rango dinámico de 25dB.

La calidad de imagen compuesta se evaluó comparando la resolución lateral y la SNR obtenida con la proporcionada por una imagen de PA (**Figura 36**). Para este propósito se comparó el patrón lateral de la intensidad de la señal correspondiente al reflector más cercano al array, ubicado a -45,4 mm (**Figura 35**). El patrón lateral es la representación gráfica de la intensidad en función de la distancia lateral para la profundidad donde se ubica el reflector.

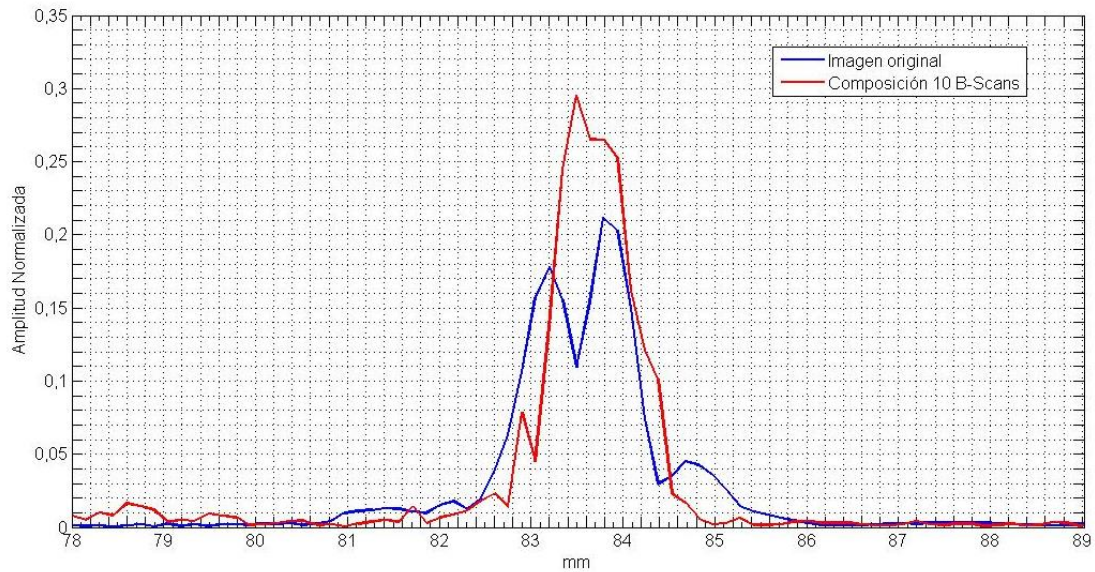


Figura 36. Comparación de patrones laterales obtenidos para un mismo reflector empleando la información de la imagen original y compuesta. La escala de amplitud está expresada en valores normalizados.

De los patrones laterales analizados, se obtienen la lectura de los valores de amplitud pico, siendo $A_{pico\ comp} = 0,295$ para la imagen compuesta y $A_{pico\ orig} = 0,212$ para la de PA. La resolución lateral se determina midiendo el ancho del lóbulo, adoptando el criterio de una caída de 6dB de amplitud. Esto es, determinar la anchura del ancho del lóbulo dentro de un rango de amplitudes que no caigan por debajo del 50% de la amplitud pico (**Figura 37**).

Una solución grafica es representar los perfiles en función de una amplitud relativa al valor pico de cada uno, con lo que obtenemos:

$$Resolución\ lateral_{original} = 1,3 [mm]$$

$$Resolución\ lateral_{composición} = 1 [mm]$$

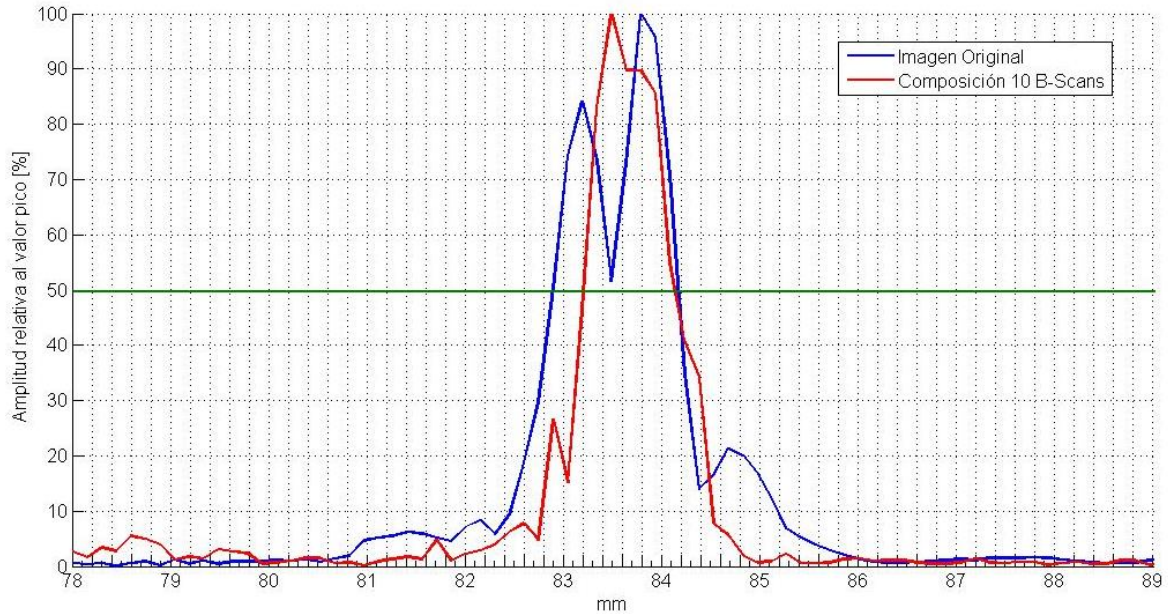


Figura 37. Comparación de perfil lateral del reflector central para la imagen original y la composición, en valores porcentuales relativos al pico.

Luego, la relación señal ruido (SNR) se determinó como:

$$SNR = 20 \log \left(\frac{A_{Pico}}{A_{Ruido}} \right) \quad (3.2)$$

Donde A_{Ruido} se determinó en base a la desviación estándar de la amplitud del ruido correspondiente a los puntos que se encuentran por debajo del 25% del valor pico, evitando así la influencia de la señal del reflector en el fondo de ruido. De acuerdo con los valores normalizados obtenidos en cada caso resulta:

- Imagen Original: $A_{Pico\ orig} = 0,212$; $A_{Ruido\ orig} = 0,04$
 $\rightarrow SNR = 20 \log \left(\frac{0,212}{0,04} \right) = 14,5 [db]$
- Imagen Compuesta: $A_{Pico\ comp} = 0,295$; $A_{Ruido\ comp} = 0,05$
 $\rightarrow SNR = 20 \log \left(\frac{0,295}{0,05} \right) = 15,4 [db]$

Por lo tanto, la SNR proporcionada por el método de composición es mejor, ya que la señal de información tiene mayor amplitud con respecto al fondo de ruido, además de presentar una resolución lateral mayor.

3.2.2 Ensayo por contacto

Este experimento se realizó con el array en contacto directo con un bloque de acero al carbono, de 41 mm de espesor, que contiene una fisura formada por mecanismo de fatiga de 11 mm de profundidad desde el fondo de la pieza y con una abertura menor a 0.1 mm (Figura 38). El ensayo propuesto exige trabajar al límite de resolución que proporciona la longitud de onda generada por el transductor en acero ($\lambda \approx 1.2$ mm).

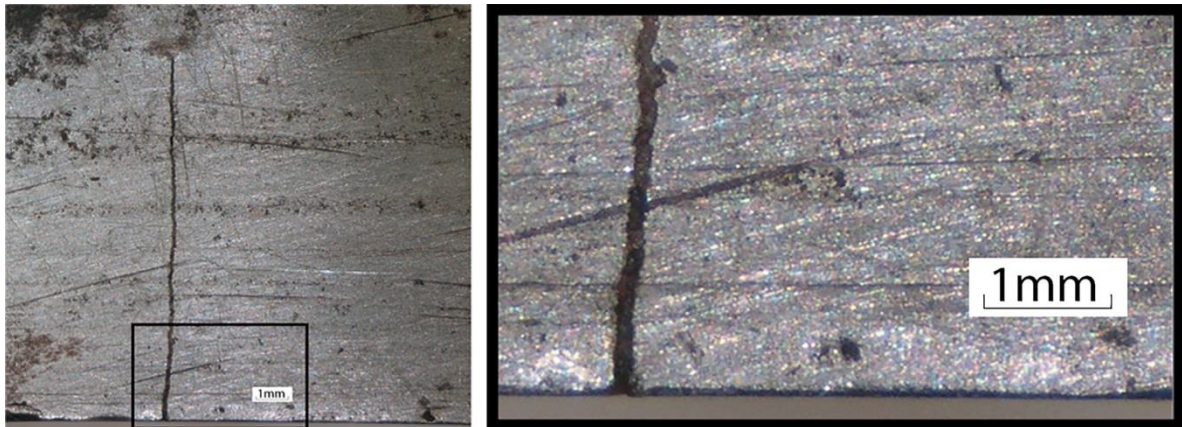


Figura 38. Fisura de fatiga estudiada, ampliada en un microscopio óptico.

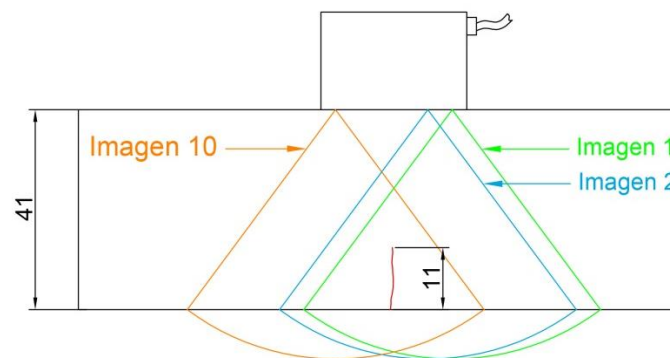


Figura 39. Esquema del ensayo de la fisura de fatiga.

El objetivo de este ensayo es verificar si además de observar la punta de la entalla (*tip*), que se comporta como un emisor puntual por el efecto de difracción, es posible distinguir las paredes y la orientación de la fisura, aprovechando la diversidad espacial que ofrece una serie

de adquisiciones del defecto desde distintas posiciones. En la **Figura 40** se observa que para obtener una señal distinguible del *tip* es necesario barrer con elevados niveles de ganancia, lo que conlleva un gran aumento del ruido en la zona superior de la imagen (campo cercano intenso a la entrada del material). Por tal motivo, se modificó el algoritmo para incrementar la ganancia de manera digital a fin de realizar un proceso de interpolación con valores de señal compensados con la pérdida de intensidad en función de la profundidad de adquisición.

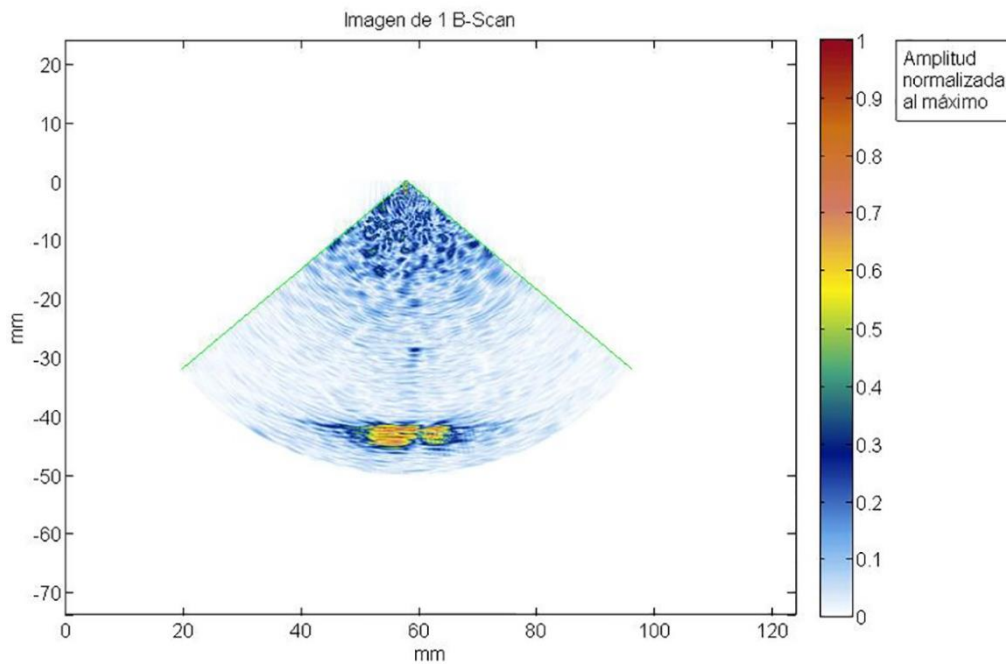


Figura 40. Imagen de la fisura de fatiga lograda con un barrido angular de $\pm 45^\circ$.

Al igual que en el experimento anterior, se capturaron 10 imágenes S-Scans separadas con una distancia equivalente a 9 pitch, y con un rango angular comprendido entre $\pm 45^\circ$ en pasos de 1° (**Figura 39**). En la imagen resultante de la composición de los 10 barridos S-Scans se observan tanto la base de la fisura como el extremo superior de forma clara y hasta puede distinguirse, con menor intensidad, las paredes de la fisura (**Figura 41**), confirmando así la mejora en la resolución lateral y el contraste de la imagen compuesta.

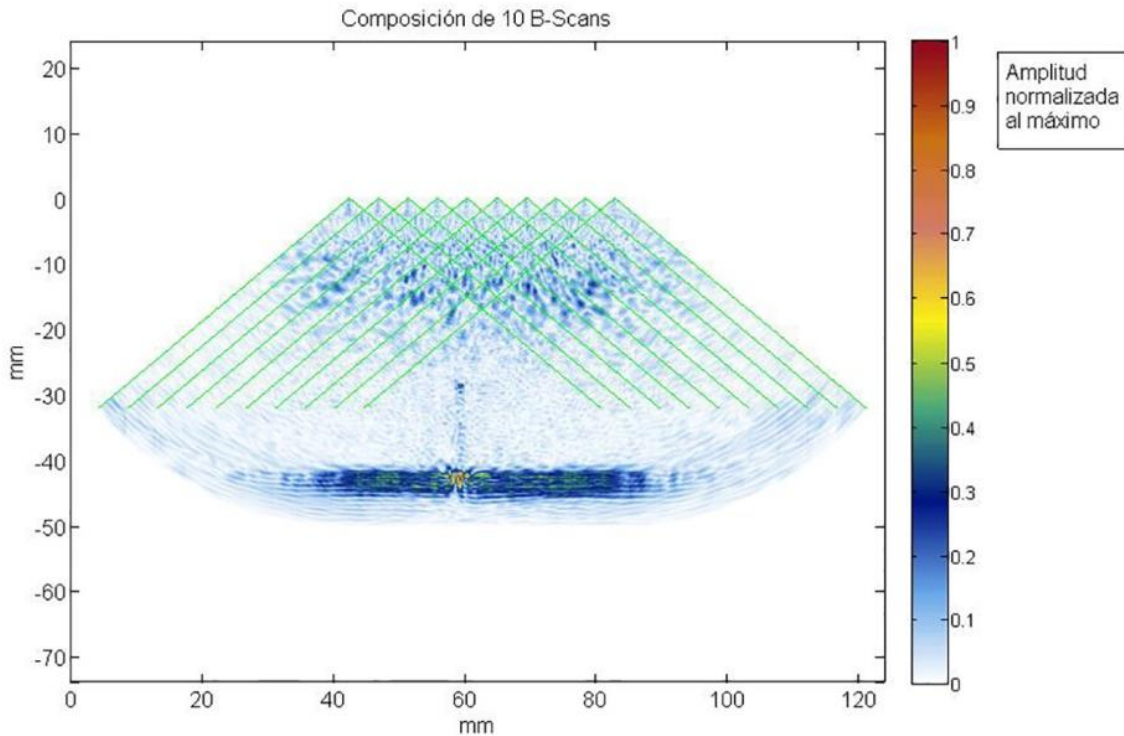


Figura 41. Imagen compuesta por 10 barridos S-Scans de la fisura de fatiga.

3.3 Ensayo con interfaz

3.3.1 Interfaz de agua (composición con traslación)

En este caso se utilizó como pieza de ensayo una sección de una cañería de 160 mm de diámetro exterior, que cuenta con una pared de 30 mm de espesor y que posee una serie de perforaciones pasantes en su interior de 2 mm de diámetro, utilizadas como reflectores de referencia (**Figura 42**). La pieza está fabricada en acero inoxidable austenítico AISI 304L, $c_l = 5,79 \text{ mm}/\mu\text{s}$ [58]. Este material, por sus propiedades mecánicas y de resistencia a la corrosión intergranular [59], es habitualmente usado en la fabricación de componentes en la industria nuclear, para reactores de agua pesada presurizada (PHWR) [60], [61], y suele ser utilizado para la construcción de tubos de calandria y cañerías del circuito del moderador en las centrales tipo CANDU [62]. No obstante, algunas características del acero austenítico (anisotropía y estructura cristalina de grano grueso) suelen producir bajos niveles de SNR cuando son inspeccionados con frecuencias del orden de 5MHz o superiores. Una mala SNR conlleva a una reducción en el contraste de los defectos reales en la imagen de ultrasonidos.

Este efecto, también conocido como *backscattering*, suele ser evidenciado en zonas de soldaduras con aporte de austenítico, en donde los bordes de grano se comportan como dispersores que no pueden ser resueltos individualmente, y producen múltiples ecos que se interfieren mutuamente [63]–[67].

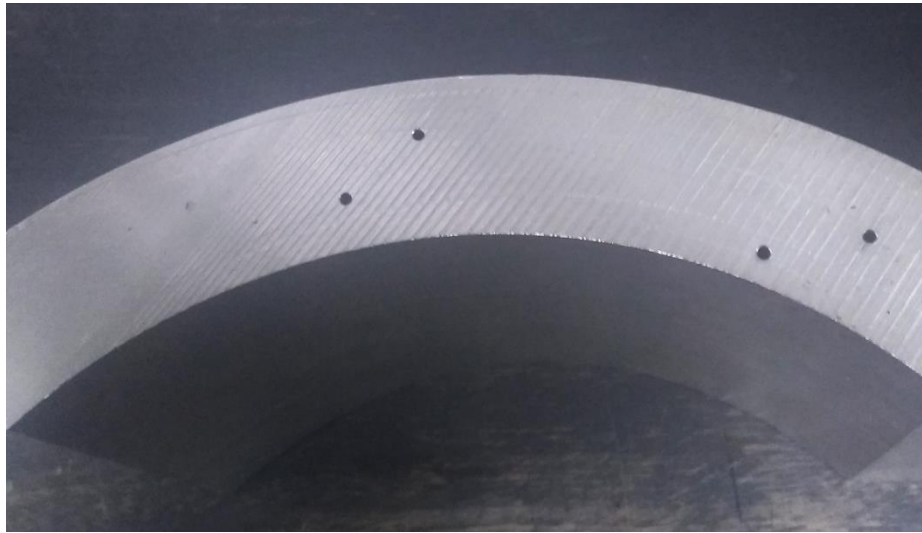


Figura 42. Probeta tubular de acero inoxidable austenítico.

La inspección se efectuó en condiciones de inmersión para adaptar la superficie del array a la curvatura de pieza. En este escenario, la columna de agua entre el transductor y la pieza garantiza el correcto acoplamiento acústico. No obstante, la presencia de una interfaz ocasiona el efecto de refracción, tal como fue mencionado en la sección 2.3.2.2. Al tratarse de una superficie curvada, el fenómeno de refracción se torna aún más complejo puesto que el ángulo de la normal a superficie varía. En este caso, para abordar la interpolación bilineal con una interfaz irregular, se propuso como solución determinar los ángulos de refracción y puntos de entrada de cada línea de barrido que requiere el algoritmo, empleando la técnica de autoenfoco ya implementada en el sistema SITAU [55].

El ensayo se realizó componiendo barridos lineales con haz normal (B-Scans sin deflexión angular), en donde cada barrido está limitado por las dimensiones del array y de la apertura empleada para generar los haces. En concreto, el ancho de una imagen B-Scan de haz normal estará dado por:

$$W_{BScan} = (N - Na + 1).pitch \quad (3.2)$$

En donde N es el número total de elementos del array, Na es la cantidad de elementos utilizados para la generación del haz (apertura activa). Así, para el transductor de $N = 128$ elementos y $pitch$ de 0,5 mm y con $Na = 32$ elementos, se obtiene que cada imagen ocupa un ancho de $W_{BScan} = 48.5$ mm. Por lo tanto, un único barrido no cubrirá toda la pieza. Por lo tanto, para explorar todo el bloque, el transductor fue montado sobre el manipulador de la cuba de ensayos para generar un barrido mecánico auxiliar. En total se capturaron 9 imágenes de PA distancias sucesivamente a 20 mm, siguiendo el esquema propuesto en la **Figura 43**.

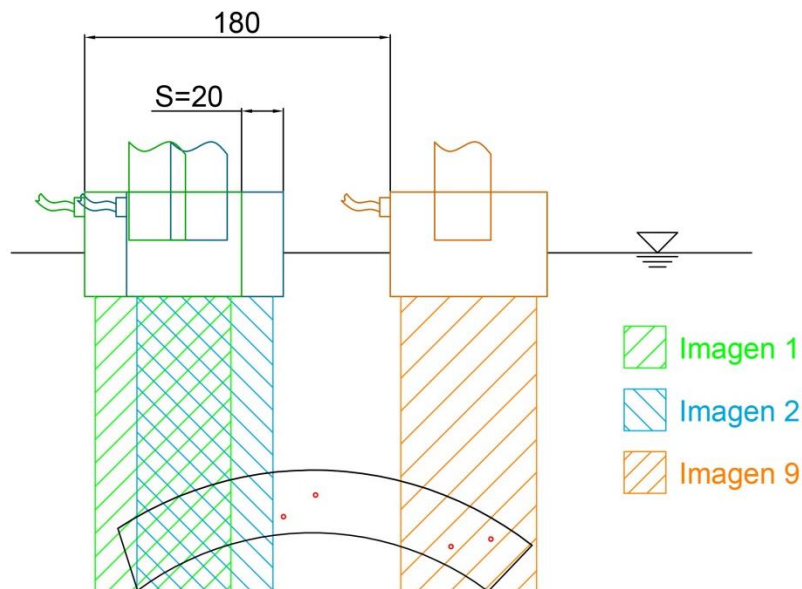


Figura 43. Esquema del ensayo de la probeta tubular en inmersión.

En la imagen compuesta del ensayo se destaca la buena resolución con la que se describe la curvatura externa (interfaz) e interna de la pieza (**Figura 44**). También se observa una buena intensidad de la señal para los reflectores ubicados en la región donde se produce el mayor solapamiento de imágenes B-Scan (4 imágenes), mientras que para los taladros ubicados en el extremo de la pieza la señal es relativamente baja (**Figura 45**). En efecto, esto se debe a que en esa área de la imagen final sólo se produce la superposición de 1 o 2 imágenes.

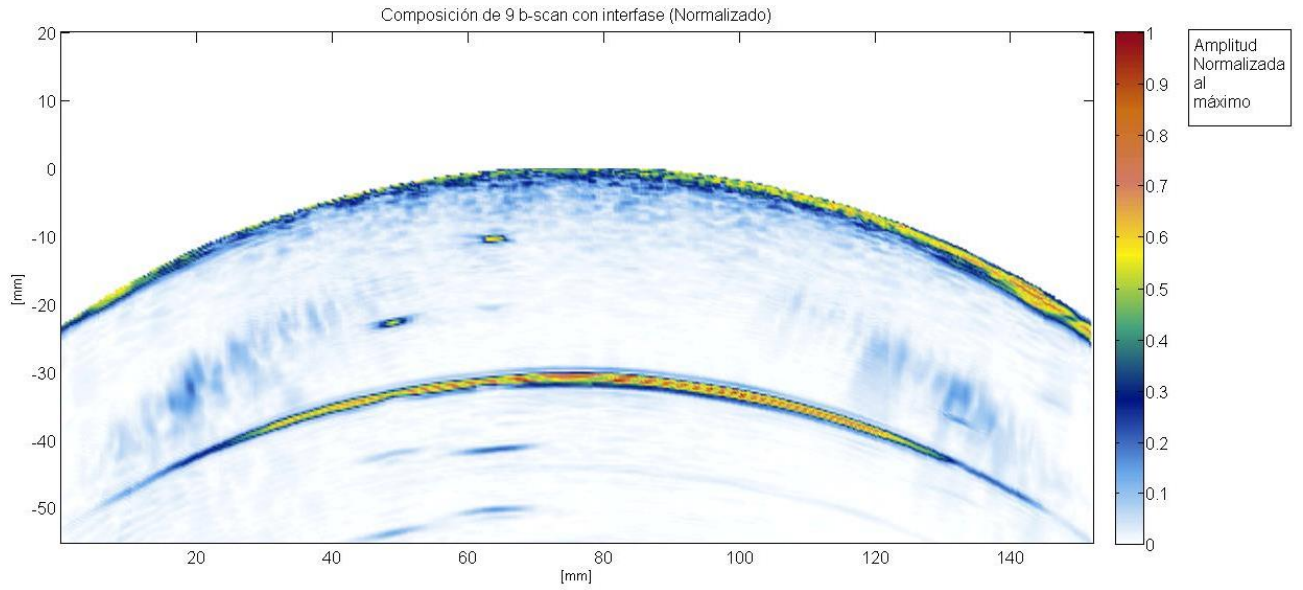


Figura 44. Imagen resultante de la composición coherente de 9 imágenes B-Scans con haz normal de la pieza tubular.

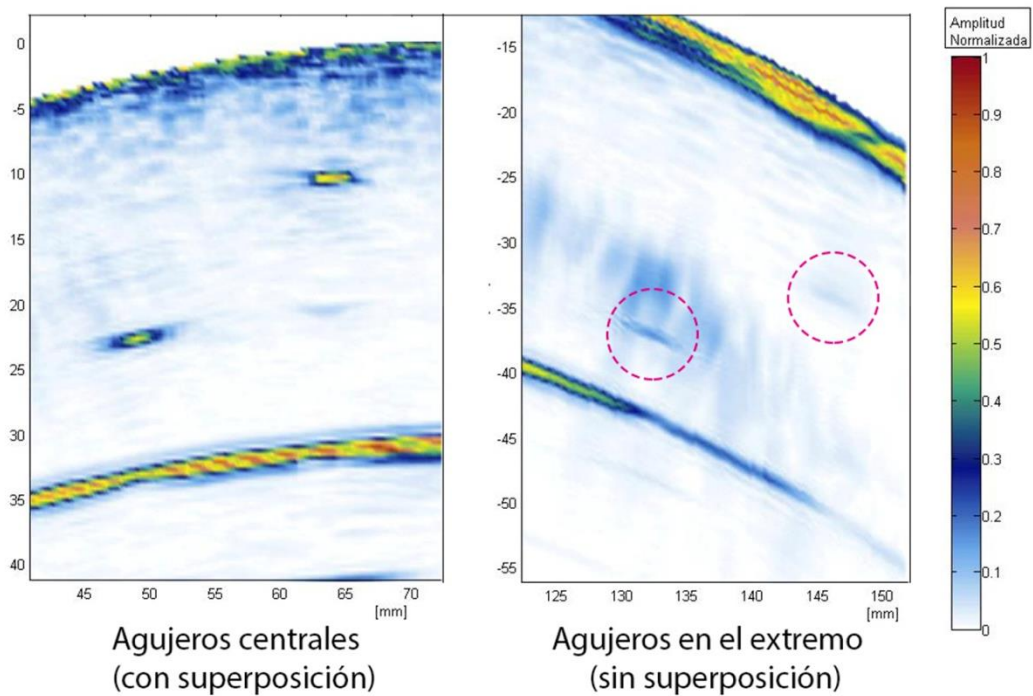


Figura 45. Comparación de reflectores centrales con superposición de imágenes y sin superposición.

Además de las claras diferencias que existen en el contraste de los defectos en la zona con superposición y en la zona sin superposición, se destaca el sustancial aumento en el campo de visión (función del número y la separación de imágenes de las imágenes originales). La composición coherente de toda la información adquirida permite describir en una sola imagen toda la pieza, poco frecuente para un ensayo tradicional de PA. Esto se debe a que se requiere una elevada inversión en softwares dedicados a esta finalidad y que siempre están limitados a aplicaciones específicas.

3.3.2 Zapata polimérica (composición con traslación y giro)

El experimento se realiza sobre un escenario más habitual en los END industriales. En este caso se utilizó una zapata realizada en un reticulado plástico de poliestireno (Rexolite[®]) para ondas longitudinales SA12-N60L (Olympus Corporation Ltd.), sobre la que se dispuso el array de 5 MHz (**Figura 46**). Esta configuración de ensayo requiere considerar la interfaz entre el plástico y la pieza, antes de aplicar el método de composición de imágenes basado en la interpolación, en donde las líneas de barrido ya no confluyen desde un único origen.



Figura 46. Montaje realizado para adaptar la zapata al transductor.

En el algoritmo se contempla la posición y traslación del transductor. Para esto se implementó una funcionalidad que permite introducir imágenes, no sólo tomadas desde distintos puntos, sino que también puedan tener una orientación “enfrentada”, es decir que los barridos estén sobre un mismo plano de adquisición, pero rotados 180° respecto a la zona de

interés. Esta estrategia permite cambiar la orientación del barrido y acceder desde el lado posterior a la región de interés y lograr una inspección más completa.

La calibración de esta nueva función fue verificada realizando un ensayo sobre una pieza de acero inoxidable (304 L) ($c_l = 5,75 \text{ mm}/\mu\text{s}$) que posee un taladro pasante de 3 mm de diámetro a una profundidad de 16 mm de la cara superior de la misma. La composición de verificación se realizó con la adquisición de siete imágenes S-Scans: tres barridos con orientación izquierda – derecha, con una apertura activa de 32 elementos y variando el punto de emisión en pasos de 5 mm (distancia equivalente a 10 pitch del array). Las cuatro imágenes PA restantes se capturaron con iguales características de emisión, pero con orientación contraria y desplazando el transductor una distancia de 92 mm (**Figuras 47 y 48**).

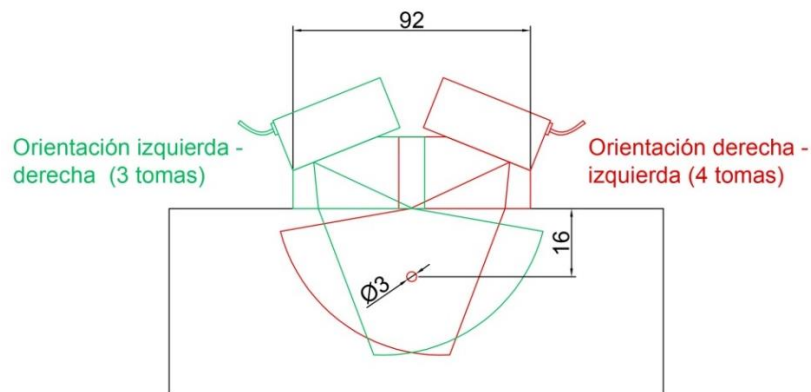


Figura 47. Esquema del ensayo de calibración de composición con traslación y giro del transductor.

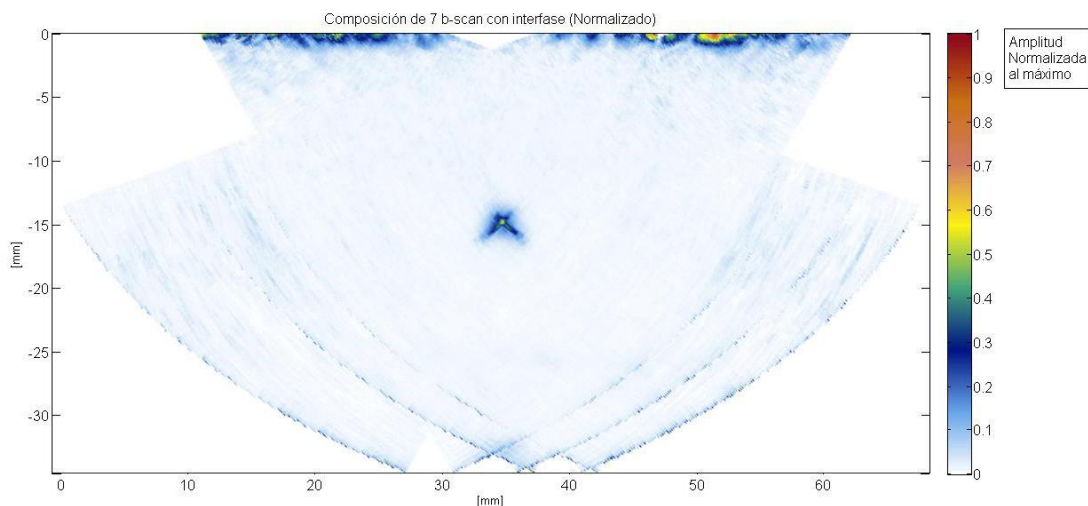


Figura 48. Imagen resultante de la composición coherente (con traslación y giro) de 7 S-Scans, utilizada para verificar la propuesta.

Una vez verificada la función de composición con traslación y giro, se pasó a experimentar sobre un bloque patrón para PA modelo Test Block Type B (SIUI, China, y aportado por [ENOD S.R.L.](#), Argentina), fabricado en una aleación de acero AISI-SAE 1018 ($c_l = 5,893 \text{ mm}/\mu\text{s}$). Se consideró como región de interés a los 18 taladros pasantes de 1 mm de diámetro distribuidos en un radio de 25 mm en forma de semicírculo (**Figura 49**).

Las imágenes a componer fueron adquiridas sobre un mismo plano empleando barridos electrónicos angulares comprendidos entre 30° y 70° , con diferentes orientaciones del haz. La posición de la apertura activa de 32 elementos se desplazó dentro del array.

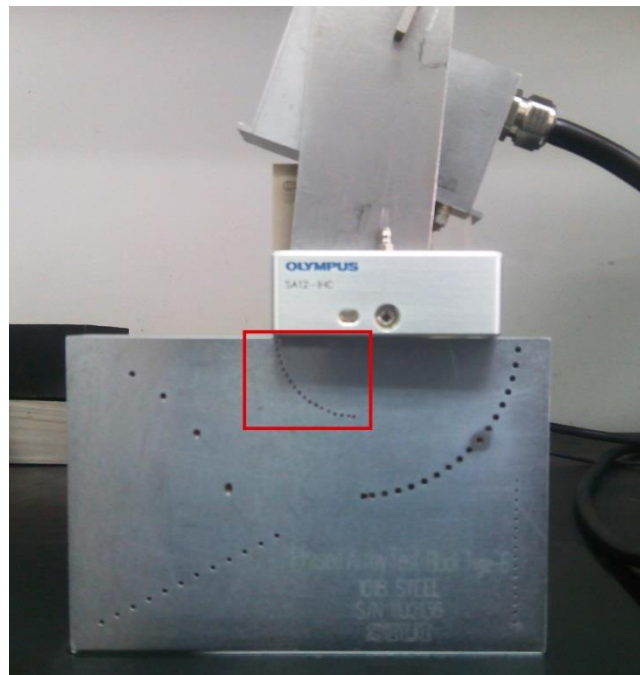


Figura 49. Montaje de array y cuña sobre el “Test Block Type B” y región de interés.

Los taladros comprendidos dentro de la región de interés no pueden ser resueltos con un único barrido sectorial, ya que los reflectores están muy próximos entre sí, lo que ocasiona una interferencia entre sus respectivas señales. Además, están al límite de la resolución angular de la apertura activa utilizada (**Figura 50**).

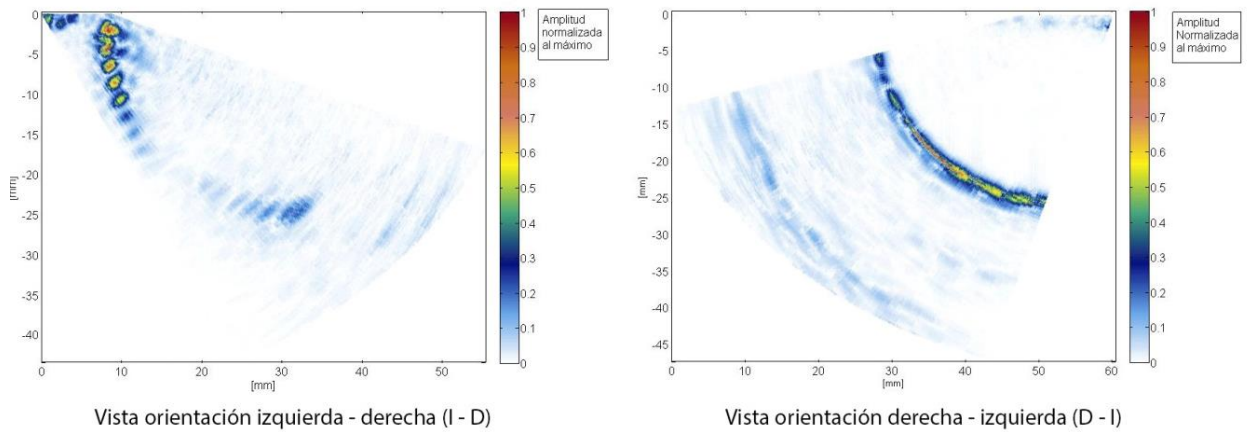


Figura 50. Imágenes S-Scan tomadas desde distintos puntos y con distinta orientación, de los taladros seleccionados para la experimentación dentro del “Test Block Type B”.

En la **Figura 50** se observa que las adquisiciones con orientación izquierda-derecha son capaces de resolver con claridad los agujeros más cercanos a la superficie. Sin embargo, la ubicación cercana al array que tienen los primeros taladros provocan un efecto de “sombra acústica” al resto de los reflectores más alejados. En consecuencia, no pueden ser distinguidos, hasta incluso algunos no logran ser “vistos”. Para las imágenes con orientación contraria, los reflectores centrales producen una respuesta de mayor intensidad porque están en una ubicación que favorece la reflexión de los haces del barrido. Sin embargo, no pueden ser resueltos en su totalidad por la falta de resolución angular (haz ancho) que provoca la interferencia entre los reflectores. También, puede observarse en ambas imágenes que el origen de los haces no es común como en los ensayos sin interfaz.

La zona de interés fue reconstruida adquiriendo dos grupos de múltiples imágenes con diferentes rangos angulares y orientaciones. El primer grupo consistió en tres imágenes con orientación izquierda-derecha (para conseguir información de los reflectores más cercanos a la superficie), mientras que el segundo grupo de siete imágenes, se obtuvo desplazando el transductor 86 mm y realizando barridos con una orientación contraria (derecha-izquierda) y con un rango angular que permita abarcar la mayor cantidad de reflectores (**Figura 51**). Al igual que en los casos anteriores, los puntos de entrada de cada línea se obtuvieron con el sistema SITAU.

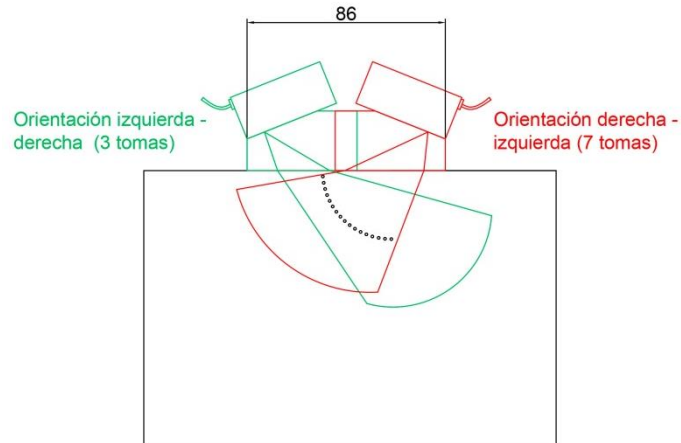


Figura 51. Esquema del ensayo sobre la probeta “Test Block Type B”.

Al efectuar la composición de las dos series de capturas efectuadas, se logra aprovechar toda la diversidad espacial que ofrece el ensayo y representarlo en una única imagen de salida (**Figura 52**). Comparando con las imágenes originales se observa claramente que en la composición resultante se pueden distinguir casi la totalidad de los taladros que contiene la región de interés seleccionada (**Figura 53**)

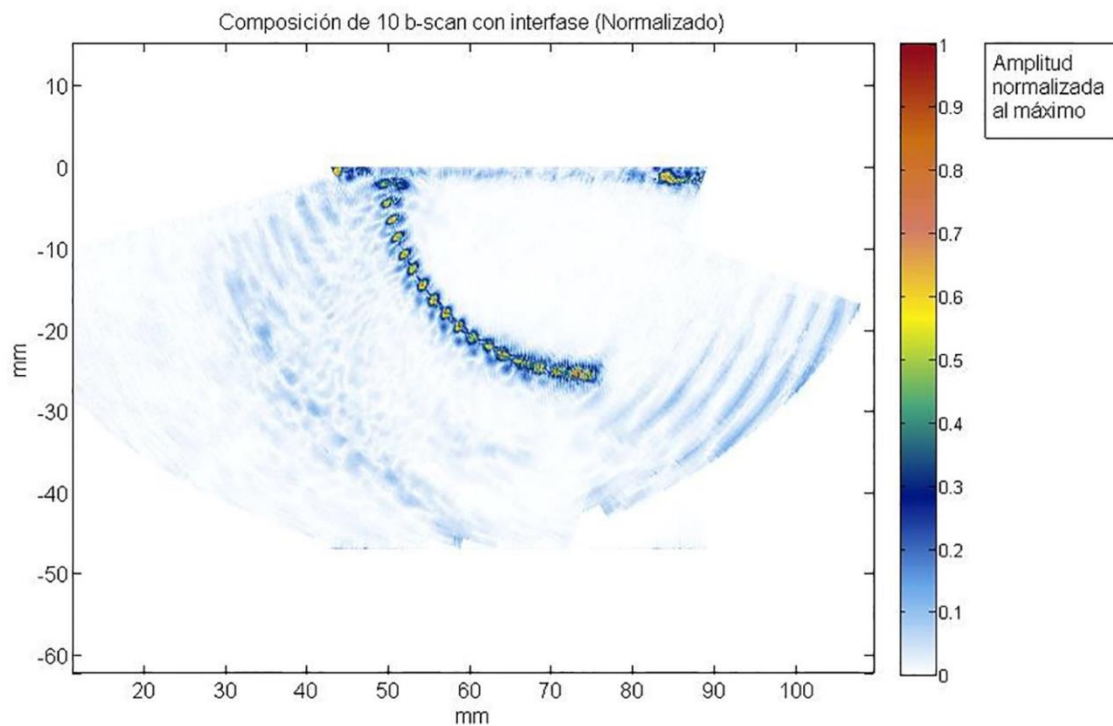


Figura 52. Imagen compuesta del “Test Block Type B” a partir de la captura de 3 barridos S-Scans con orientación izquierda-derecha y de 7 imágenes S-Scans con orientación derecha-izquierda.

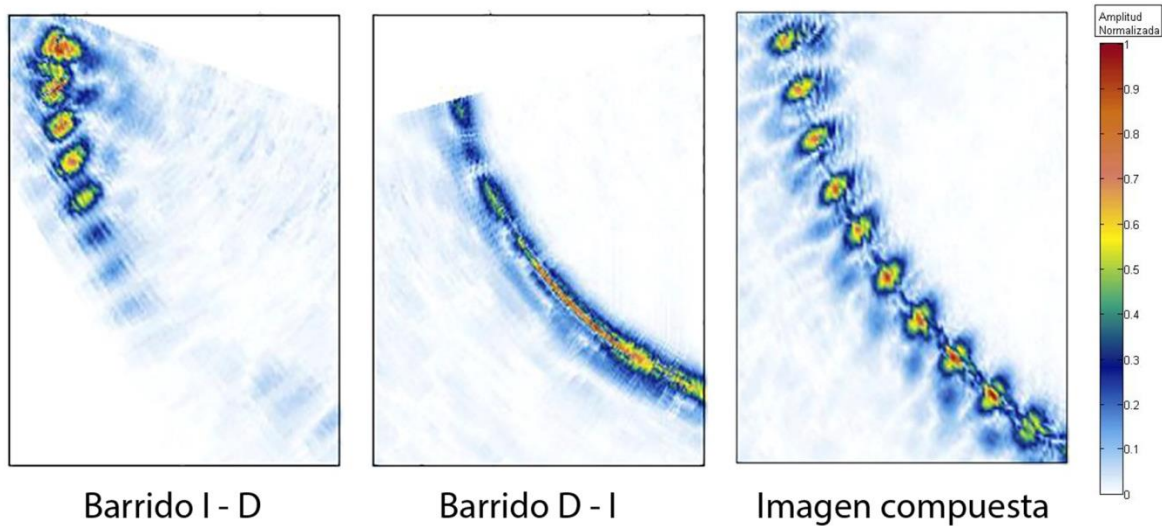


Figura 53. Detalle de la zona de los reflectores cercanos a la superficie adquiridos con un barrido de orientación izquierda-derecha (izquierda), imagen de los reflectores en la región central vistos por un barrido de orientación derecha - izquierda (centro), y detalle de todos los reflectores contenidos en la imagen compuesta.

3.4 Composición por reflexión especular

El fenómeno de reflexión de la onda de ultrasonido, comentado anteriormente en la sección 1.2.2, resulta fundamental en el análisis de los ensayos por ultrasonidos. Puesto que las reflexiones en el interior de la pieza muchas veces pueden devenir en la formación de ecos que dan lugar a una interpretación más compleja. Uno de los casos más usuales se da en la evaluación de piezas de poco espesor, tal como se ejemplifica en la **Figura 54**.

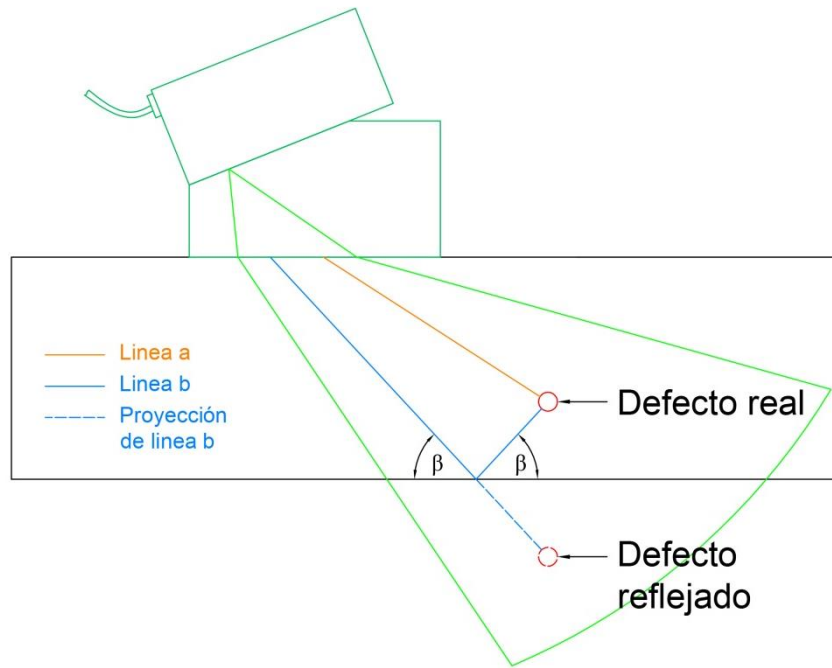


Figura 54. Esquema de una señal especular de un defecto.

En el esquema de la **Figura 54**, se muestra un trazado de rayos para una pieza que tiene un taladro como reflector de referencia. La evaluación se realiza con un array montado sobre una zapata, operando en pulso-eco y realizando un barrido angular. Línea A de barrido, daría una señal de respuesta que tiene información directa de la posición del reflector. Sin embargo, si la profundidad de adquisición es mayor que el espesor de la pieza, la imagen del barrido incluirá una segunda indicación que se encuentra fuera de los límites de la pieza. Esta indicación también es producida por el mismo reflector, pero es generada por la reflexión de algunas líneas del barrido (ejemplificadas solo con la Línea B) que se reflejan en el fondo de la pieza y llegan al reflector de forma indirecta.

La ubicación de la señal reflejada está dada por el ángulo de reflexión (α) que forma la línea A-Scan con la normal a la superficie del fondo (que por simplicidad en la representación de la **Figura 54** se indicó su complementario, β) y por la distancia del defecto al punto de reflexión. En piezas de base plana, esta señal está ubicada simétricamente (de manera especular) con respecto de dicha superficie.

El fenómeno de la reflexión es utilizado frecuentemente cuando se quiere inspeccionar una zona dentro del componente, a donde se tiene un difícil acceso. Aprovechando esta situación, se buscó aumentar la diversidad espacial de un mismo barrido, creando una nueva función en

el algoritmo que permite espejar la región que se encuentra por debajo de la línea base y componer la información mediante la superposición coherente de señales. La propuesta permite aumentar la intensidad de señal y facilitar la interpretación del reflector (**Figura 55**).

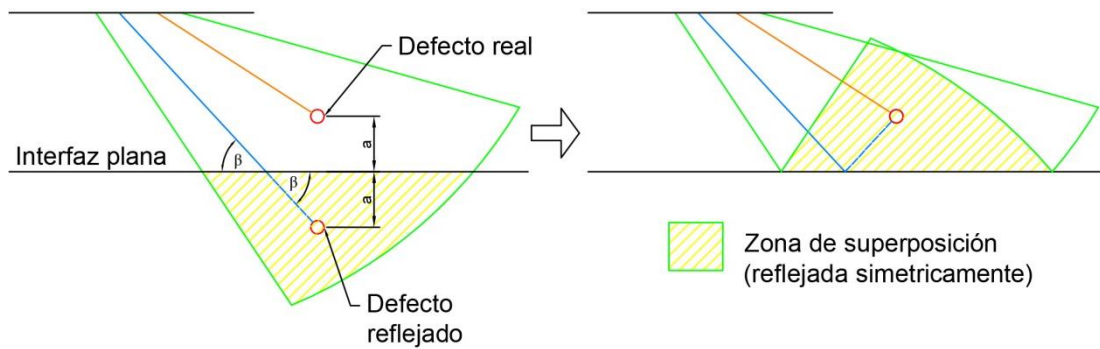


Figura 55. Esquema de una composición con reflexión especular.

La experimentación de esta propuesta de composición espacial se realizó sobre la probeta patrón US714 de acero inoxidable austenítico de 23 mm de espesor, que posee un cordón de soldadura de 17 mm de ancho con un ángulo de bisel de 40°. La soldadura posee un taladro pasante de 3 mm de diámetro ubicado sobre la línea central de fusión, además, una entalla de sección cuadrada de 3 mm, mecanizada próxima a la raíz de la soldadura (**Figura 56**).



Figura 56. Probeta de acero inoxidable austenítico con un cordón de soldadura y entallas de referencia.

La unión captada por una imagen S-Scan tomada desde el lado izquierdo a 30 mm respecto a la línea central del cordón de la soldadura, con un rango angular de -20° a $+60^\circ$, paso angular de 1° , rango de adquisición 60 mm, y utilizando ondas longitudinales se observa en la **Figura 57**. En la imagen S-Scan se observa claramente el eco que se produce en el fondo de la pieza (indicación ubicada a 23 mm). Por otro lado, el taladro se logra distinguir con una buena SNR tanto de forma directa como por la reflexión en la pared interior de la pieza. No obstante, la entalla ubicada la zona de la raíz, así como el perfil del cordón de soldadura no son bien resueltos.

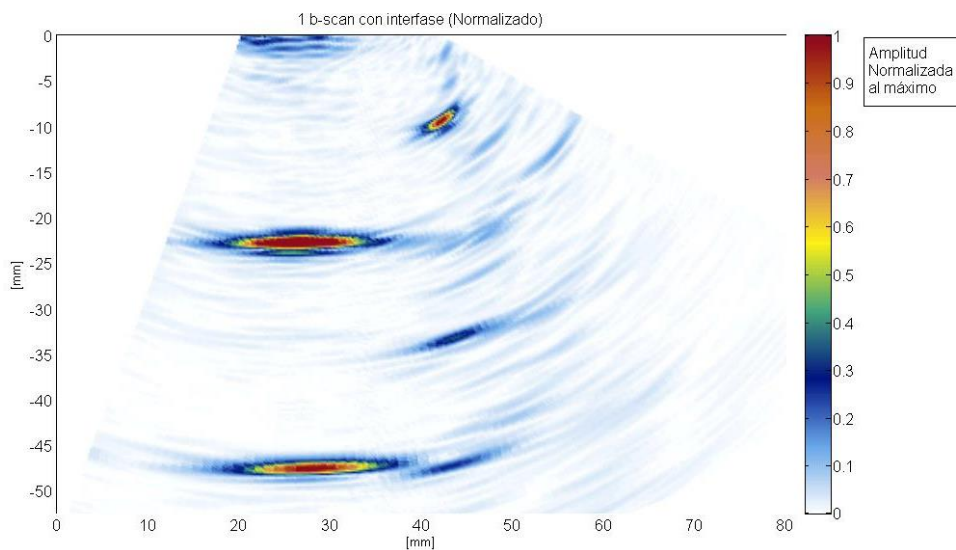


Figura 57. Imagen S-Scan del cordón de soldadura de acero inoxidable austenítico.

Para lograr una mejor repuesta que la proporcionada por la imagen convencional de PA mostrada en la **Figura 57**, se realizaron cuatro barridos angulares desde la cara superior de la pieza, utilizando una apertura activa de 32 elementos para la emisión de haces dentro de un rango angular comprendido entre -20° y $+60^\circ$, y en recepción se utilizó focalización dinámica. Dos de los barridos se realizaron con orientación izquierda - derecha (desde el lado de las entallas), mientras que los restantes fueron ejecutados con una orientación contraria, con el fin de observar los reflectores de referencia atravesando el cordón de soldadura.

Luego de realizar la interpolación de las imágenes, del mismo modo que en los casos anteriores, se adicionó de forma coherente sobre la imagen de salida, toda la información reflejada en el fondo de la pieza. En la imagen resultante, es posible ubicar y medir la

posición de los dos defectos de referencia, y hasta incluso se puede estimar el perfil del cordón de soldadura (**Figura 58**).

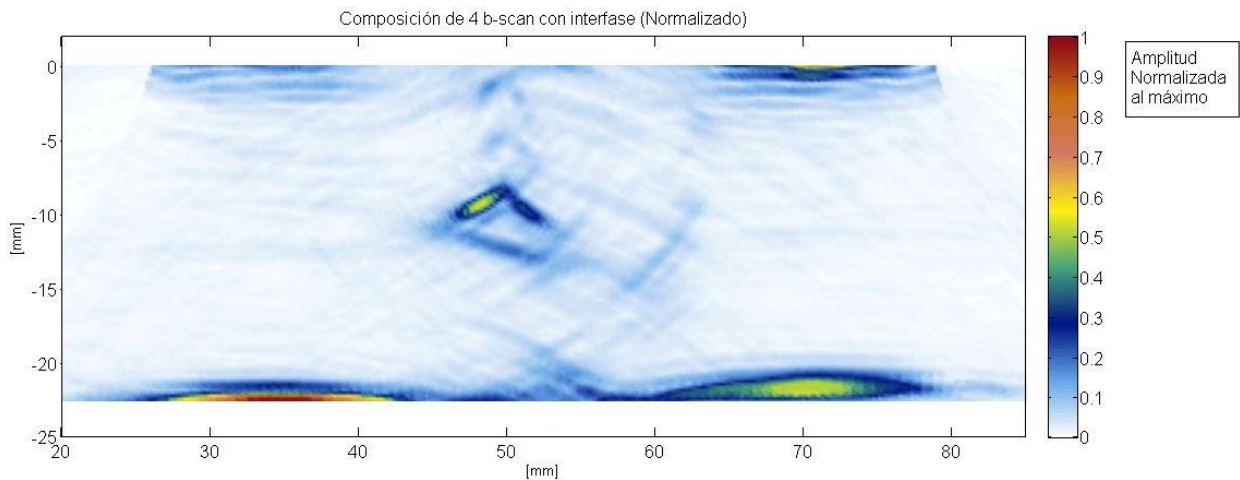


Figura 58. Composición con reflexión especular de 4 B-Scans de la probeta de acero inoxidable austenítico soldada.

En la imagen resultante de la composición se destaca la no coincidencia de las reflexiones que provienen del taladro. Esto sucede por la diferencia en los tiempos de vuelo de cada haz hasta alcanzar el taladro. Al no tratarse de un reflector puntual, sino todo lo contrario, es un taladro que tiene una dimensión mayor en comparación con una longitud de onda, existe una diferencia en los caminos sónicos de cada barrido hasta la superficie del taladro que es significativa (**Figura 59**). Además, es destacable la clara diferencia de intensidades entre las señales que proviene del reflector. Esto se puede estimar mediante el trazado de rayos, por ejemplo, para el barrido con orientación de izquierda – derecha, los haces que llegan al reflector de manera directa (representado por la línea A en la **Figura 59**) tendrán mayor intensidad, que los ecos producidos por haces reflejados en el fondo de la pieza (ejemplificado por la señal B). En efecto, existe una mayor pérdida porcentual de energía asociada por la reflexión en el fondo de la pieza y en la superficie redondeada del reflector (ver sección 1.2.2). Por otro lado, al considerar el barrido con orientación derecha – izquierda, los haces que llegan de forma directa al reflector (representados por la línea C) tendrán una menor intensidad que la señal A, puesto que los haces de ultrasonidos deben atravesar las interfaces que delimitan la soldadura, lo que conlleva una pérdida de energía. En efecto, el material de la unión posee la estructura cristalina que es altamente dispersiva y que

introduce elevados niveles de atenuación en la señal por efectos de absorción y dispersión, además de generar ruido estructural (*scattering* producido en los bordes de grano) [27], [65]. Por estas razones, todos los haces que regresan del reflector de forma directa o indirecta hacia el transductor (representadas por la línea C y D) sufrirán una atenuación mayor.

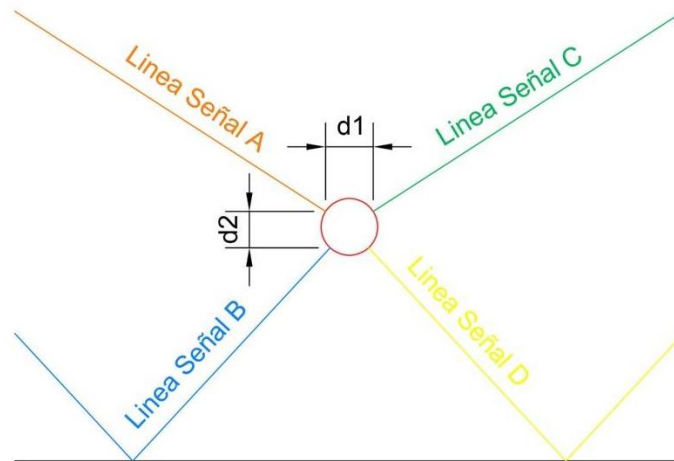


Figura 59. Distancias entre los puntos de intersección de distintas líneas de barrido y un defecto no puntual.

También puede observarse en la imagen compuesta, aunque con menor intensidad que las indicaciones del taladro, los ecos correspondientes a la entalla en la cara inferior. En la imagen resultante, las indicaciones de la entalla no aportan la suficiente información sobre su geometría. Esto se debe por dos motivos, primero por la geometría del reflector y segundo, por su ubicación. En efecto, son pocos los haces que llegan a la entalla (tamaño reducido), además se produce una doble reflexión entre el fondo de la pieza y el vértice de la entalla (efecto de esquina), con lo cual se tiene poca información de este defecto.

Por otro lado, la interfaz del cordón de soldadura, a pesar de la falta de contraste, puede ser estimado si se observa con atención el resto de las indicaciones, que comparado con la imagen original existe una clara aproximación en la detección de su perfil. Para poner más en evidencia estos resultados, en la **Figura 60** se ofrece una comparación entre la fotografía de la soldadura, la imagen compuesta al incluir las reflexiones de forma coherente en escala normalizada y luego expresada en decibelios con un rango dinámico de -30dB. Sobre las

imágenes se coloca una máscara (en color magenta) que destaca el perfil de la soldadura y la entalla.

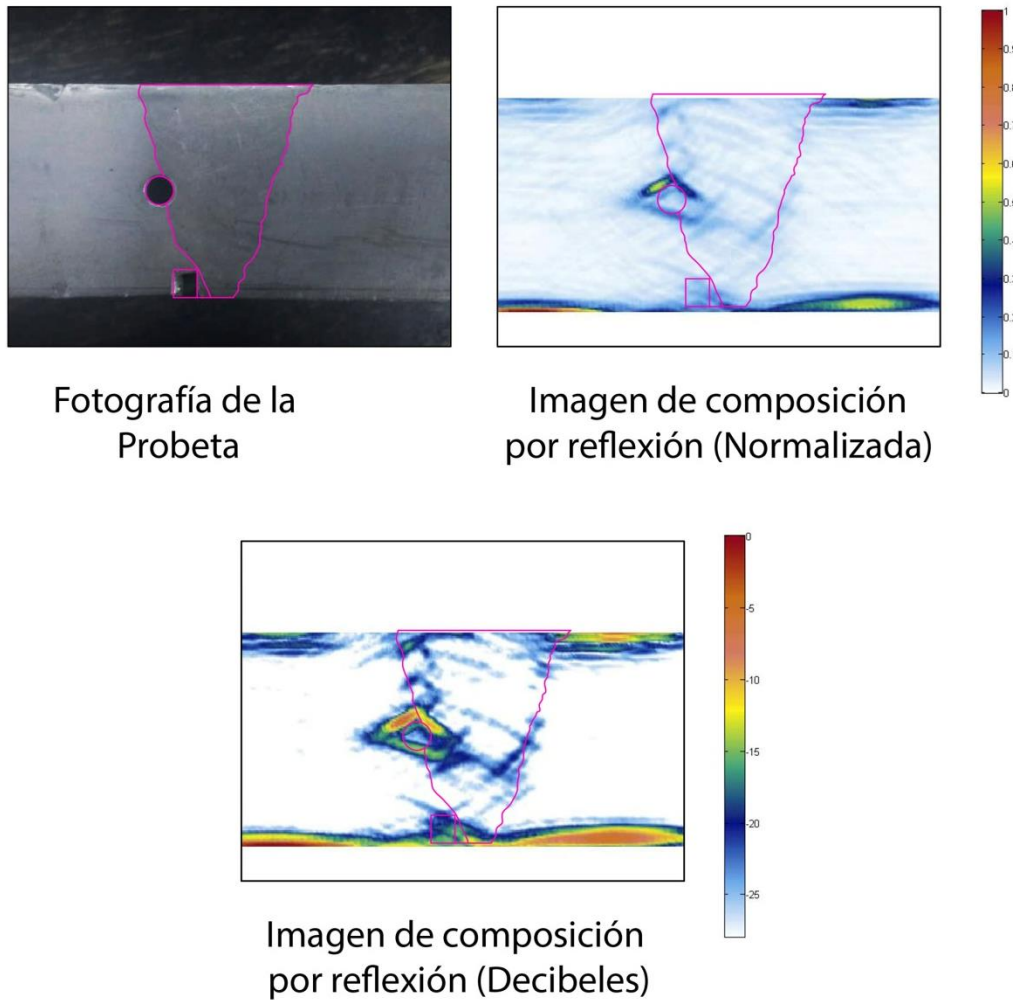
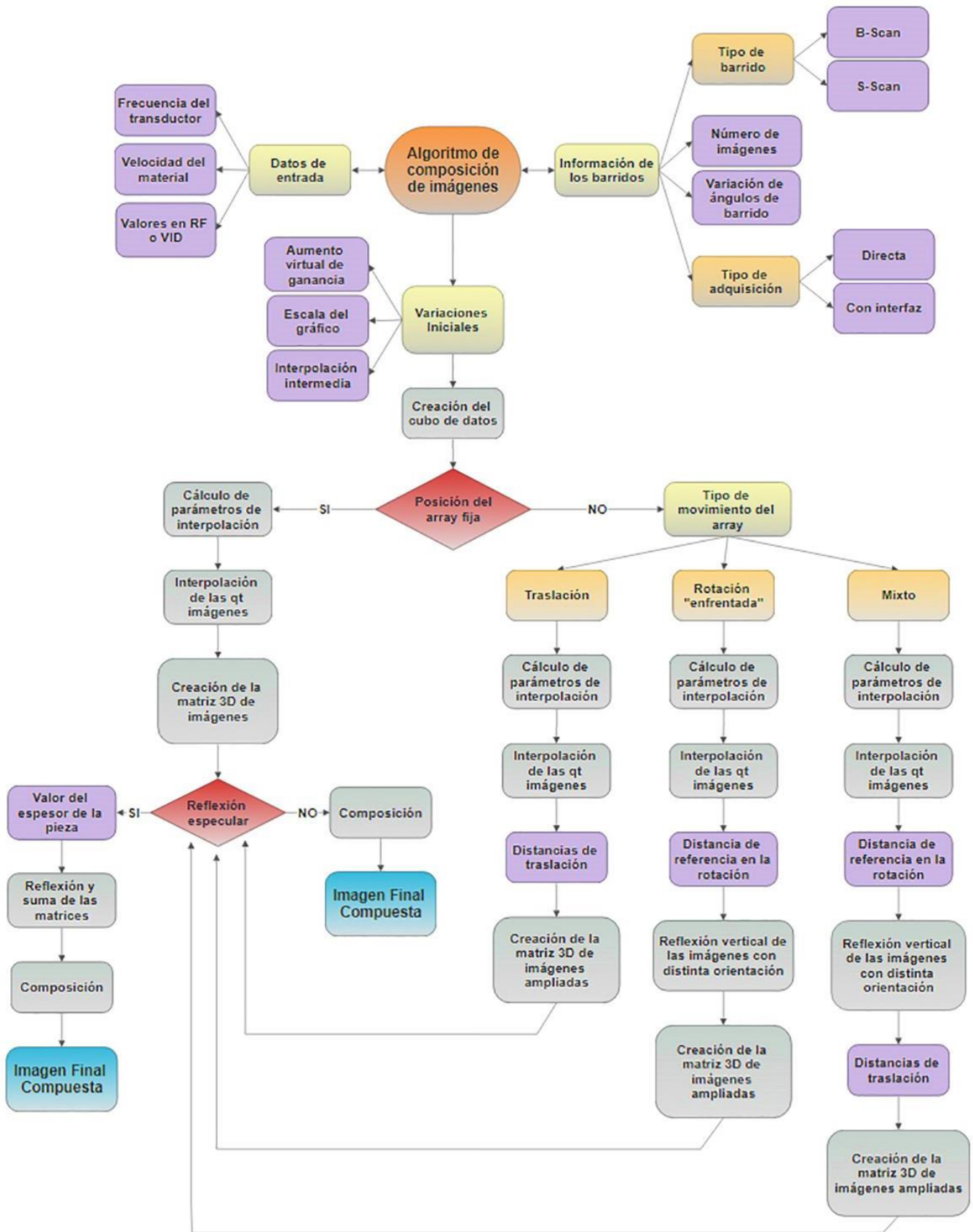


Figura 60. Comparación de una fotografía y las imágenes por composición por reflexión especular en escala normalizada y en decibeles.

3.5 Diagrama de flujo del algoritmo final obtenido



4. Conclusiones

La composición espacial y coherente de múltiples imágenes ha demostrado que tiene un gran potencial de aplicación en los END industriales, ya que mejora la detección de defectos y aumenta la información que proporciona la tecnología de Phased Array. En este trabajo se ha desarrollado un algoritmo genérico para la composición de imágenes que, a diferencia de los costosos softwares dedicados a esto, la propuesta es capaz de realizar la combinación de imágenes con diferentes características de barrido.

La mejora en la relación señal ruido (SNR) y en la resolución lateral conllevan a una mayor capacidad en la detección de defectos, permitiendo realizar sobre ellos una apropiada evaluación cuantitativa y cualitativa. Asimismo, el efecto de promediado evita tener que recurrir a grandes niveles de ganancia en la adquisición, situación que conllevaría a la saturación de las señales que provienen de otros reflectores y al aumento del nivel de ruido.

La diversidad espacial permite mejorar el contraste de la imagen compuesta y reducir los problemas asociados con los artefactos de las imágenes de ultrasonidos. Por lo tanto, la imagen final presenta una mayor calidad que las imágenes convencionales de PA.

Por otra parte, la posibilidad de promediar la información en las zonas de superposición permite una reducción en los efectos vinculados a la interacción de defectos muy próximos entre sí y disminuir los niveles de ruido. Esto es debido a que mientras la intensidad de los reflectores (como ser fisuras, defectos, cambios de fase) se mantiene, el nivel ruido en un punto está definido por su aleatoriedad y cambia en cada adquisición.

Por último, se destaca que el método propuesto es flexible, ya que permite trabajar con barridos lineales y sectoriales, además se puede operar en contacto o con interfaz, con distintas posiciones, orientaciones y características de emisión. Por lo tanto, la correcta utilización del equipo de PA sumado a las posibilidades brindadas por el algoritmo de interpolación, permiten obtener y combinar toda información adquirida con una gran diversidad espacial, en una única imagen. Esto permite detectar y evaluar piezas de diferentes formas y materiales, así como defectos con orientación o distribución geométrica compleja. Las posibilidades de mejoras en la capacidad de resolución, el contraste, la relación señal

ruido y el campo de visión permiten obtener una imagen final de alta precisión y calidad superior, que puede ser utilizada en el ámbito de END industriales.

Por lo tanto, el aspecto genérico del algoritmo permite ser utilizado con cualquier tipo de equipamiento, siempre que se tenga acceso a los datos de adquisición. Esta particularidad es lo que lo diferencia de las aplicaciones comerciales, que solo proveen opciones limitadas de combinación y además son exclusivas de cada equipamiento.

5. Anexo

5.1 Descripción de las técnicas END

Aparte del método de ultrasonidos, a continuación, se describen de forma resumida los otros métodos de END más usuales en la industria. Se destacan el área de aplicación, ventajas y limitaciones:

➤ **Inspección Visual (IV)**

- Utiliza la luz reflejada o transmitida en los objetos bajo prueba para ser evaluados por el ojo humano u otro dispositivo sensible a la luz visible.
- **Aplicaciones:** en la industria su uso es diverso, desde la inspección de materias primas hasta productos finales e inspecciones en servicio.
- **Ventajas:** es un método de bajo costo y simple. Sin embargo, requiere capacitación y experiencia.
- **Limitaciones:** solo permite efectuar una evaluación superficial. Además, es necesario contar con una correcta iluminación.

➤ **Líquidos penetrantes (LP)**

- Utiliza líquidos coloreados o fluorescentes, que son aplicados en la superficie de la pieza y penetran en los defectos por efecto capilar.
- **Aplicaciones:** prácticamente sobre cualquier sólido no absorbente, sin recubrimiento y libre de contaminantes.
- **Ventajas:** es una técnica relativamente simple de usar y de bajo costo. Gran sensibilidad y versatilidad.
- **Limitaciones:** solo sirve para detectar discontinuidades abiertas a la superficie. La superficie debe ser preferentemente lisa y sin contaminantes.

➤ **Partículas Magnéticas (PM)**

- Consiste en aplicar partículas ferromagnéticas sobre la superficie de la pieza a ensayar, y luego se la expone a un campo magnético que produce la alineación de las partículas sobre las discontinuidades.

- **Aplicaciones:** en toda pieza de material ferromagnético, de cualquier tamaño. Detecta discontinuidades superficiales y a escasa profundidad.
- **Ventajas:** simple de usar y equipamiento no muy costoso. Puede tener una mayor sensibilidad que los LP.
- **Limitaciones:** permite detectar defectos superficiales y levemente subsuperficiales y solo en materiales ferromagnéticos.

➤ **Radiografía Industrial (RI)**

- Consiste en atravesar con radiación electromagnética ionizante (rayos gamma o X) la pieza bajo ensayo. Las discontinuidades en el material absorben en mayor o menor medida la radiación, que es detectada al exponer un material sensible a la radiación (placa radiográfica).
- **Aplicación:** en la mayoría de las piezas y materiales (soldaduras, piezas coladas, etc.) tanto en el proceso de manufacturación o en servicio.
- **Ventajas:** gran sensibilidad, se genera un registro permanente. Es ampliamente usada y aceptada como técnica de inspección volumétrica.
- **Limitaciones:** la densidad del material condiciona el espesor de la pieza a ensayar. La orientación de defectos planos es crítica. Los riesgos asociados con la radiación son elevados y muy severos para los operarios.

➤ **Corrientes Inducidas (CI)**

- Se basa en campos eléctricos localizados e inducidos en una pieza de material conductor a través del principio de electromagnetismo.
- **Aplicación:** prácticamente cualquier material conductor puede ser examinado en búsqueda de fallas, o de conocer sus propiedades metalúrgicas y de conductividad.
- **Ventajas:** rápido, versátil, sensible, y puede operar sin contacto. Se puede usar para inspecciones in-situ.
- **Limitaciones:** las variables deben ser entendidas y controladas correctamente. Reducida profundidad de penetración. Las condiciones superficiales afectan a su rendimiento.

➤ **Termografía**

- Se basa en la medición de temperatura superficial y sus variaciones mediante instrumentos o cámaras sensibles al infrarrojo.
- **Aplicaciones:** en la mayoría de los materiales y componentes en donde los cambios de temperatura están asociados a su condición de operación.
- **Ventajas:** es extremadamente sensible a pequeños cambios en la temperatura, tanto de pequeñas piezas como de grandes superficies.
- **Limitaciones:** no es efectiva para la detección de fallas en piezas de gran espesor. La emisividad de la superficie condiciona el ensayo.

➤ **Emisión Acústica**

- Se basa en la emisión de ondas mecánicas que son producidas por las discontinuidades cuando la pieza es sometida a esfuerzos. Las vibraciones viajan a través del material y son detectadas mediante sensores.
- **Aplicaciones:** en soldaduras, recipientes a presión, máquinas rotativas, materiales compuestos y otras estructuras sujetas a tensiones o cargas.
- **Ventajas:** grandes áreas pueden ser monitoreadas para detectar condiciones de deterioro. Se puede predecir la posibilidad de falla.
- **Limitaciones:** los sensores deben estar en contacto con la superficie. Se requieren múltiples sensores para localizar la falla. Es necesario realizar un extenso análisis de la señal recibida.

5.2 Clasificación de los END según principio físico

Principio Físico	Técnica END
Óptico	Inspección visual, líquidos penetrantes.
Radiación Ionizante	Radiografía industrial.
Radiación Infrarroja	Termografía
Electromagnetismo	Partículas magnéticas, corrientes inducidas.
Acústica	Ultrasonido, emisiones acústicas.

Tabla 2. Clasificación de los END por principio físico.

5.3 Clasificación de los END según rango de alcance

Zona de evaluación – Posición del defecto	Técnica No Destructiva
Superficial – Escasa profundidad	Inspección visual, Líquidos penetrantes, Partículas magnéticas, Corrientes inducidas.
Volumétrica – Interior de la pieza	Radiografía, Ultrasonidos.

Tabla 3. Clasificación de los END zona de evaluación – posición del defecto.

5.4 Velocidades de propagación para diferentes materiales.

Material	Velocidad longitudinal [mm/μs]	Velocidad transversal [mm/μs]
Acero 1020	5,893	3,251
Acero 4340	5,842	3,251
Acero inoxidable Serie 300	5,61 - 5,79	3,05 – 3,12
Aluminio 1100-0	6,229	3,073
Aluminio 6061-T6	6,299	3,150
Bronce	3,531	2,235
Plomo	2,159	0,813
Zirconio	4,648	2,362
Zircaloy	4,724	2,261
Acrílico (Perspex)	2,73	1,43
Concreto	4,242 – 5,258	3,429
Carbon-Epoxy (Compuesto)	2,972	1,956
Agua	1,473	Sin componente transversal
Aceite (SAE 20)	1,753	Sin componente transversal
Aire	0,356	Sin componente transversal

Tabla 4. Velocidades longitudinales y transversales para distintos materiales.

5.5 Valores de la impedancia acústica en distintos materiales.

Material	Impedancia acústica “Z” $10^6 [kg/m^2s]$
Acero 1020	45,4
Acero 4340	45,6
Acero inoxidable Serie 300	44,6 – 45,4
Aluminio 1100-0	17,1
Aluminio 6061-T6	17,0
Bronce	31,3
Plomo	23,5
Zirconio	30,1
Zircaloy	44,2
Acrílico (Perspex)	3,2
Concreto	12,4
Carbon-Epoxy (Compuesto)	4,65
Agua	1,48
Aceite (SAE 20)	1,51
Aire	0,00041

Tabla 5. Impedancia acústica de distintos materiales.

6. Referencias

- [1] C. J. Hellier, *Handbook of Nondestructive Evaluation*, vol. 69. 2012.
- [2] M. Omar, *Nondestructive Testing Methods and New Applications*. 2012.
- [3] AEND, *Cualificación y certificación del personal que realiza ensayos no destructivos según la norma UNE en ISO 9712:2012*. 2016.
- [4] Carlos Núñez Antoni Roca Jordi Jorba, *Comportamiento Mecánico de los Materiales Volumen 2 : Ensayos mecánicos . Ensayos no destructivos*. 2011.
- [5] A. C. Veca and E. Accolti, *Ultrasonido para Ingenieros y Estudiantes de Ingeniería*. 2016.
- [6] M. L. Lenhardt, “Ultrasonic Hearing in Humans: Applications for Tinnitus Treatment,” *Int. Tinnitus J.*, vol. 9, no. 2, pp. 69–75, 2003.
- [7] N. Hozumi *et al.*, “Ultrasonic sound speed microscope for biological tissue characterization driven by nanosecond pulse,” *Acoust. Sci. Technol.*, vol. 24, no. 6, pp. 386–390, 2003.
- [8] D. W. Baker, “Pulsed Ultrasonic Doppler Blood-Flow Sensing,” *IEEE Trans. Sonics Ultrason.*, vol. 17, no. 3, pp. 170–184, 1970.
- [9] J. Kräutkramer and H. Kräutkramer, *Ultrasonic testing of materials*. 1987.
- [10] A. Beléndez, *Acústica, fluidos y termodinámica*. 1992.
- [11] N. Netshidavhini and R. B. Mabuza, “Effects of Various Couplants on Carbon Steel and Aluminium Materials Using Ultrasonic Testing,” *18th World Conf. Nondestruct. Test.*, no. April, pp. 16–20, 2012.
- [12] P.P. Nanekar and B. K. Shah, “Characterization of Material Properties by ultrasonics,” *Natl. Semin. Non-Destructive Eval.*, no. 249, pp. 25–38, 2003.
- [13] L. Satyanarayan, C. Sridhar, C. V. Krishnamurthy, and K. Balasubramaniam, “Simulation of ultrasonic phased array technique for imaging and sizing of defects using longitudinal waves,” *Int. J. Press. Vessel. Pip.*, vol. 84, no. 12, pp. 716–729, 2007.
- [14] L. Carter and A. Rogerson, “Advances in ultrasonic flaw characterisation,” in *10th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized*, 1980, no. Advanced Technologies, pp. 885–893.
- [15] J. Poguét, A. Garcia, J. Vazquez, and J. Marguet, “Phased Array Technology. Concepts, probes and applications,” in *8th European Congress on Non Destructive Testing*, 2002, pp. 1–7.
- [16] S.-C. Wooh and Y. Shi, “Influence of phased array element size on beam steering behavior,” *Ultrasonics*, vol. 36, pp. 737–749, 1998.
- [17] P. D. W. Bruce W. Drinkwater, “Ultrasonic arrays for non-destructive evaluation: A review,” *NDT E Int.*, vol. 39, no. 7, pp. 525–541, 2006.
- [18] J. H. Lee and S. W. Choi, “A parametric study of ultrasonic beam profiles for a linear phased

- array transducer.," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 47, no. 3, pp. 644–50, 2000.
- [19] F. Marefat, M. R. Faghedi, a R. Khodabandeh, and M. Reza, "Capabilities and Limitations of Radiography and Phased Array Ultrasonic Test in the Detection of subtle welding defects," in *Singapore International NDT Conference*, 2011, pp. 1–8.
- [20] J. C. Somer, "Electronic sector scanning for ultrasonic diagnosis.," *Ultrasonics*, vol. 6, no. July, pp. 153–159, 1968.
- [21] R. J. Mailloux, "Phased array theory and technology," *Proc. IEEE*, vol. 70, no. 3, pp. 246–291, 1982.
- [22] O. T. Von Ramm and S. W. Smith, "Beam Steering with Linear Arrays," *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. BME-30, no. 8, pp. 438–452, 1983.
- [23] A. Erhard, H. Wüstenberg, G. Schenk, and W. Möhrle, "Calculation and construction of phased array-UT probes," *Nucl. Eng. Des.*, vol. 94, no. 3, pp. 375–385, 1986.
- [24] T. R. Gururaja, W. a. Schulze, L. E. Cross, and R. E. Newnham, "Piezoelectric Composite Materials for Ultrasonic Transducer Applications. Part II: Evaluation of Ultrasonic Medical Applications," *IEEE Trans. Sonics Ultrason.*, vol. 32, no. 4, pp. 481–498, 1985.
- [25] G. Street and G. X. W. Glasgow, "Monolithic phased array for the transmission of ultrasound in NDT ultrasonics," *Ultrasonics*, vol. 24, pp. 148–155, 1986.
- [26] W. a. Smith, "The role of piezocomposites in ultrasonic transducers," in *Proceedings., IEEE Ultrasonics Symposium*, 1989, pp. 755–766.
- [27] Jorge Camacho Sosa Dias, "Imagen ultrasónica por coherencia de fase," 2009.
- [28] T. Armitt, "Phased Arrays Not The Answer To Every Application," in *6th European Conference on NDT*, 2006, pp. 1–15.
- [29] K. K. Shung and M. J. Zipparo, "Ultrasonic transducers and arrays," *IEEE Eng. Med. Biol. Mag.*, vol. 15, no. 6, pp. 20–30, 1996.
- [30] S. McAleavey, "Ultrasonic Backscatter Imaging by Shear-Wave-Induced Echo Phase Encoding of Target Locations," *IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control*, vol. 58, no. 1, pp. 102–111, 2011.
- [31] J. Q. Guo *et al.*, "Research on improving lateral resolution of ultrasound phased array elements by using sparse matrix," *Appl. Mech. Mater.*, vol. 380–384, pp. 3409–3412, 2013.
- [32] F. Benzarti and H. Amiri, "Speckle Noise Reduction in Medical Ultrasound Images," *Int. J. Comput. Sci. Issues*, vol. 9, no. 2, pp. 1–8, 2012.
- [33] J. L. S. A. N. Emeterio, E. Pardo, A. Ramos, and I. D. A. Csic, "Ultrasonic Grain Noise Reduction using Wavelet Processing . An Analysis of Threshold Selection Rules," in *ECNDT*, 2006, pp. 1–8.
- [34] A. Ng and J. Swanevelder, "Resolution in ultrasound imaging," *Contin. Educ. Anaesthesia, Crit. Care Pain*, vol. 11, no. 5, pp. 186–192, 2011.
- [35] J. Chen, Y. Shi, and S. Shi, "Noise analysis of digital ultrasonic nondestructive evaluation system," *Int. J. Press. Vessel. Pip.*, vol. 76, no. 9, pp. 619–630, 1999.
- [36] L. Vergara-Dominguez and J. M. Páez-Borralló, "Backscattering grain noise modelling in

- ultrasonic non-destructive testing,” *Waves in Random Media*, vol. 1, no. 1, pp. 81–92, 1991.
- [37] M. Romero, “Conformación de haces ultrasónicos mediante muestreo selectivo con codificación delta,” 2015.
- [38] K. J. T. Kremkau, F. W., “Artifacts in ultrasound imaging,” *Journal of ultrasound in medicine*. pp. 227–237, 1986.
- [39] David P. Shattuck and Olaf T. von Ramm, “Compound scanning with a phased array,” *Ultrason. Imaging*, vol. 4, pp. 93–107, 1982.
- [40] M. Berson, “Compound scanning with an electrically steered beam,” *Ultrason. Imaging*, vol. 3, no. 3, pp. 303–308, 1981.
- [41] H. Jespersen, S. K., Wilhjelm, J. E., & Sillesen, “Multi-angle compound imaging,” *Ultrason. Imaging*, vol. 20, pp. 81–102, 1998.
- [42] D. Robinson and P. Knight, “Computer reconstruction techniques in compound scan pulse-echo imaging,” *Ultrasonic Imaging*, vol. 3, no. 3. pp. 217–234, 1981.
- [43] W. Gebhardt, “Improvement of ultrasonic testing by phased arrays,” *Nucl. Eng. Des.*, vol. 76, no. 3, pp. 275–283, 1983.
- [44] R. R. Entekin, B. A. Porter, H. H. Sillesen, A. D. Wong, P. L. Cooperberg, and C. H. Fix, “Real-time spatial compound imaging: Application to breast, vascular, and musculoskeletal ultrasound,” *Semin. Ultrasound CT MRI*, vol. 22, no. 1, pp. 50–64, 2001.
- [45] G. Montaldo, M. Tanter, J. Bercoff, N. Bencech, and M. Fink, “Coherent plane-wave compounding for very high frame rate ultrasonography and transient elastography,” *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 56, no. 3, pp. 489–506, 2009.
- [46] R. Rohling, A. Gee, and L. Berman, “Three-dimensional spatial compounding of ultrasound images,” *Med. Image Anal.*, vol. 1, no. 3, pp. 177–193, 1997.
- [47] F. L. T. Paul A. Magnin, Olaf T. von Ramm, “Frequency compounding for speckle contrast reduction in phased array images,” *Ultrason. Imaging*, vol. 4, pp. 267–281, 1982.
- [48] G. Cincotti, G. Loi, and M. Pappalardo, “Frequency decomposition and compounding of ultrasound medical images with wavelet packets,” *IEEE Trans. Med. Imaging*, vol. 20, no. 8, pp. 764–771, 2001.
- [49] Y. Erez, Y. Y. Schechner, and D. Adam, “Ultrasound Image Denoising by Spatially Varying Frequency Compounding,” in *Joint Pattern Recognition Symposium*, 2006, pp. 1–10.
- [50] V. Behar, D. Adam, and Z. Friedman, “A new method of spatial compounding imaging,” *Ultrasonics*, vol. 41, no. 5, pp. 377–384, 2003.
- [51] D. Robinson and P. Knight, “Interpolation scan conversion in pulse-echo ultrasound,” *Ultrason. Imaging*, vol. 310, pp. 297–310, 1982.
- [52] J. Go, K. Sohn, and C. Lee, “Interpolation using neural networks for digital still cameras,” *IEEE Trans. Consum. Electron.*, vol. 46, no. 3, pp. 610–616, 2000.
- [53] J. a Parker, R. V Kenyon, and D. E. Troxel, “Comparison of interpolation methods for image resampling,” *IEEE Trans. Med. Imaging*, vol. 2, no. 1, pp. 31–39, 1983.
- [54] N. A. Dodgson, “Quadratic Interpolation for Image Resampling,” *IEEE Trans. image Process.*, vol. 6, no. 9, pp. 1322–1326, 1997.

- [55] J. Camacho, J. F. Cruza, J. Brizuela, and C. Fritsch, “Automatic dynamic depth focusing for NDT,” *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 61, no. 4, pp. 673–684, 2014.
- [56] C. Fritsch, J. Camacho, J. M. Moreno, J. Brizuela, and L. Poveda, “Array virtual para cálculo de leyes focales,” in *Tecniacústica 2011*, 2011, pp. 1–7.
- [57] L. Fritsch, Carlos; F. Cruza, Jorge; Camacho, Jorge; Moreno, Jose Miguel; Brizuela, Jose; Medina, “Controlador de enfoque dinámico para sistemas de imagen ultrasónica,” P201230799, 2012.
- [58] General Electric, “Sound Speeds and Pipe Size Data - Installation Reference.” pp. 1–27, 2004.
- [59] U. Kamachi Mudali, B. M. Ananda Rao, K. Shanmugam, R. Natarajan, and B. Raj, “Corrosion and microstructural aspects of dissimilar joints of titanium and type 304L stainless steel,” *J. Nucl. Mater.*, vol. 321, no. 1, pp. 40–48, 2003.
- [60] Atomic Energy Regulatory Board (India), “Radiation protection aspects in design for pressurized heavy water reactor based nuclear power plants (PHWR).” pp. 1–85, 2005.
- [61] M. D. Rudelli (CNEA), “Los materiales de construcción de los generadores de vapor y la química del agua en las centrales nucleares,” 1979.
- [62] J. E. Taylor and G. F. Lesurf, “Material selection and corrosion control methods for candu nuclear power reactors,” in *The Canadian Eastern Regional Conference of the National Association of Corrosion Engineers*, 1971, pp. 1–18.
- [63] B. Chassignole, R. El Guerjouma, M. A. Ploix, and T. Fouquet, “Ultrasonic and structural characterization of anisotropic austenitic stainless steel welds: Towards a higher reliability in ultrasonic non-destructive testing,” *NDT E Int.*, vol. 43, no. 4, pp. 273–282, 2010.
- [64] H. Yoneyama, S. Shibata, and M. Kishigami, “Ultrasonic testing of austenitic stainless steel welds,” *NDT Int.*, vol. 10, no. 8, pp. 3–9, 1978.
- [65] M. K. Murali and K. Neelakantan, “Improved ultrasonic flaw detection technique for austenitic stainless steel welds,” *NDT Int.*, vol. 14, no. 6, pp. 321–325, 1981.
- [66] P. Dombret, “Methodology for the ultrasonic testing of austenitic stainless steel,” *Nucl. Eng. Des.*, vol. 131, no. 3, pp. 279–284, 1991.
- [67] S. Halkjær, M. P. Sørensen, and W. D. Kristensen, “The propagation of ultrasound in an austenitic weld,” *Ultrasonics*, vol. 38, pp. 256–261, 2000.