

## Mejora en la calidad de imágenes ultrasónicas aplicando métodos de composición espacial y empleando sistemas de Phased Array

Improvement in the quality of ultrasonic images by applying spatial composition methods and using Phased Array systems

Dante Patricio Quirós<sup>1</sup>, José Brizuela<sup>2</sup>,  
Carlos Desimone<sup>1</sup>, Silvana Daneri<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto Sábato, Comisión Nacional de Energía Atómica – Universidad Nacional de San Martín, Centro Atómico Constituyentes, Av. Gral. Paz 1499. San Martín, Buenos Aires, Argentina.

e-mail: patricioquiros@gmail.com, desimon@cnea.gov.ar, silvanadaneri@yahoo.com.ar

<sup>2</sup> Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Comisión Nacional de Energía Atómica, Centro Atómico Constituyentes, Av. Gral. Paz 1499. San Martín, Buenos Aires, Argentina.

e-mail: josebrizuela@conicet.gov.ar

---

### RESUMEN

La técnica de ultrasonidos de Phased Array (PA) se ha convertido en una herramienta para la Evaluación No Destructiva (END) por imágenes muy utilizada en el sector industrial. La técnica PA permite realizar deflexiones y enfocar el haz de ultrasonidos en diferentes profundidades dentro del material, mediante el control electrónico de cada uno de los N elementos que componen el transductor o array, facilitando la realización de diversos barridos para generar imágenes en distintos formatos. 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 realiza con ángulos elevados. En estos casos, siempre resulta conveniente hacer exploraciones desde distintas posiciones y con diferentes rangos angulares para obtener información con diversidad espacial.

Este trabajo presenta la composición espacial y coherente de imágenes PA capturadas con distintas orientaciones y posiciones sobre la pieza, para ser combinadas en una única imagen compuesta. Se ha creado un algoritmo genérico capaz de realizar una conversión de barrido utilizando interpolación bilineal, lográndose una imagen final de mayor calidad y precisión en el análisis cuantitativo de las indicaciones. La propuesta ha sido validada sobre componentes y en materiales que pueden componer piezas de uso nuclear.

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

---

### ABSTRACT

The Phased Array Ultrasonic Technique (PAUT) has become a widely used imaging tool for the Nondestructive Testing in the industrial field. The PAUT allows making deflections and focusing the ultrasound beam at different depths within the material, through an electronic control of each one of the N elements that make up the array transducer. Thus, several electronic sweeps can be performed to obtain images in different formats. The PAUT imaging is very efficient in detecting flaws whenever they have a favorable orientation relative to the beam direction. Therefore, it is necessary to establish the transducer position and set-up the scanning correctly. Nevertheless, there are some drawbacks such as quality and intensity losses in the data when the detection is made at high angles. For these reasons, it is necessary to perform exploration 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 in different positions related to the explored volume, to produce a single image. 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 indica-

tions. The proposal has been validated on components and materials that can compose pieces of nuclear use.

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

---

## 1. INTRODUCCIÓN

Existen diversas técnicas de inspección para determinar el estado de los componentes en un sistema antes de un posible fallo. Entre ellas se destacan las de ultrasonido, por no generar radiaciones ionizantes, además, permiten su aplicación durante el servicio del componente desde una de sus caras para detectar discontinuidades volumétricas [1]. Asimismo, las técnicas de ultrasonidos (US), con la evolución de la tecnología en las últimas décadas, se han consolidado como técnicas habituales de diagnóstico por imágenes en el sector industrial, y en la evaluación no destructiva de materiales y estructuras con el fin de determinar su vida útil [2].

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 interpuestas entre transductor y pieza para examinar el interior con distintos ángulos [3], resultando un método costoso en tiempo de inspección y poco robusto.

La tecnología PA, 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 determinada dirección [4], [5]. La tecnología PA permite enfocar el haz en una determinada profundidad, controlando los retardos aplicados a los pulsos de excitación de los elementos que se activan [6], [7]. La representación gráfica de los frentes de ondas emitidos en cada dirección se los conoce como señales A-Scan, y representan la reflectividad del medio en la dirección de propagación (señales de amplitud en función del tiempo o de la distancia). Así, al variar los retardos de focalización se modifica la dirección de propagación del haz, permitiendo barrer de manera electrónica la zona de interés con disparos sucesivos. El conjunto de señales A-Scans que se obtiene de un barrido se grafica en función de las amplitudes, siguiendo un mapa de colores para generar una imagen [8]. Las imágenes pueden estar representadas en coordenadas rectangulares (imagen lineal o barrido B-Scan), que se obtienen al cambiar el grupo de elementos activos del array (apertura activa) en cada emisión y manteniendo constante la ley focal que establece la dirección del haz. También las imágenes pueden ser representadas en coordenadas polares (imagen sectorial, también llamada S-Scan), que se logran utilizando un grupo de elementos fijos del array, mientras que el ángulo de deflexión se modifica electrónicamente, ajustando las leyes focales en cada emisión. La diversidad espacial que se logra con estas posibilidades permite formular la siguiente hipótesis: que la composición de múltiples imágenes (B-Scans o S-Scans) adquiridas con direcciones diferentes del haz ultrasónico mejorará notablemente la detección de defectos con independencia de su orientación en el interior de la pieza.

Los primeros métodos de composición de imágenes ultrasónicas, basados en técnicas analógicas [9]–[11], obtenían en la imagen resultante una reducción de anomalías y un leve aumento en el campo de visión, y en la capacidad de resolución de detalles en la zona de superposición, sin embargo se producían inconvenientes relacionados con interferencias e inhomogeneidades (patrones de Moire). Trabajos posteriores obtuvieron mejoras en la relación señal ruido (SNR) [12] y reducción de artefactos inherentes al US [13]. Existen, además, estudios de composición espacial tridimensional y angular [14], [15] y otros donde la composición de imágenes fue desarrollada exclusivamente en el dominio de la frecuencia [16], [17], estos lograron resultados con mejoras en la SNR y en el contraste de las imágenes obtenidas.

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 se puede nombrar: la falta de flexibilidad (limitaciones en el número de barridos y ángulos utilizados en el escaneo), la falta de ensayos sobre materiales de uso industrial, la imposibilidad de usar interfaz (zapata), las limitaciones en el campo de visión y diversidad espacial; y la escasa resolución de defectos especulares (incapacidad de detectar defectos con orientación desfavorable a la dirección de propagación del haz). El método propuesto parte de las soluciones y capacidades ya alcanzadas, e intenta resolver algunas de las principales limitaciones buscando que sea aplicable como herramienta END dentro del ámbito industrial.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Composición de imágenes

El proceso que se propone consiste en representar sobre una matriz rectangular de píxeles, un conjunto de

imágenes de ultrasonidos adquiridas en formato rectangular o polar, sin perder la información espacial original y conservando 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 [18].

El algoritmo consta de diversas etapas, la primera es la obtención de las imágenes (B-Scans o S-Scans) del componente capturadas desde diversas posiciones. Las adquisiciones pueden ser realizadas con el transductor en contacto directo con la pieza o bien empleando una zapata de adaptación, definiendo de esta manera dos escenarios diferentes (con y sin interfaz) para ejecutar el algoritmo de interpolación.

El cubo de datos inicial está estructurado de forma matricial con dimensiones  $m \times n \times q_t$ , en donde el índice  $n$  (columnas) indica la cantidad de trazas A-Scans que forman una imagen, mientras que  $m$  representa la cantidad de muestras por línea y  $q_t$  indica la cantidad de imágenes disponibles para procesar. Luego de realizada la interpolación se obtiene una nueva matriz tridimensional de dimensiones  $v_{max\ q} \times h_{max\ q} \times q_t$ , donde  $(v_{max\ q}, h_{max\ q})$  son las dimensiones de las imágenes parciales en píxeles. Finalmente se realiza la composición de las  $q_t$  imágenes para obtener la imagen final como se observa en el esquema de la Figura 1.

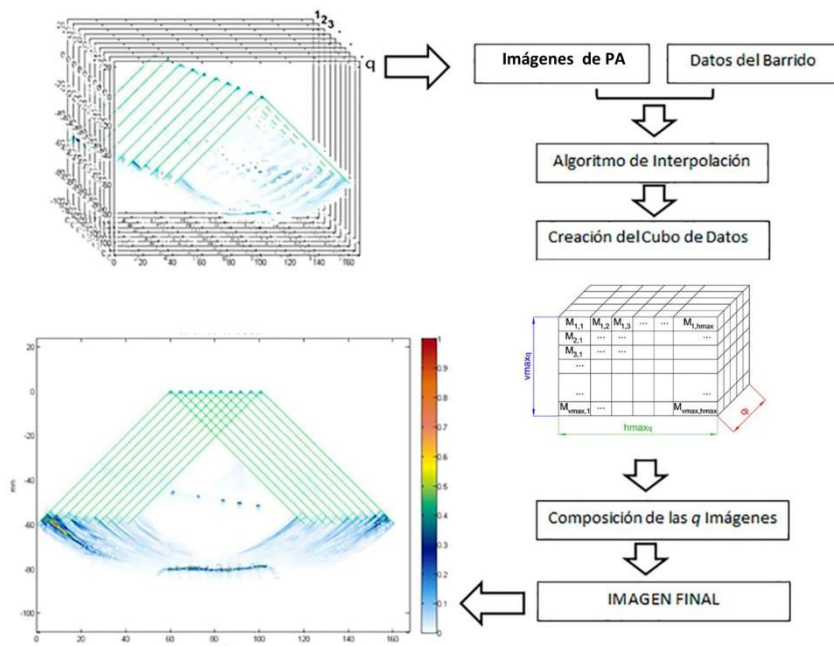
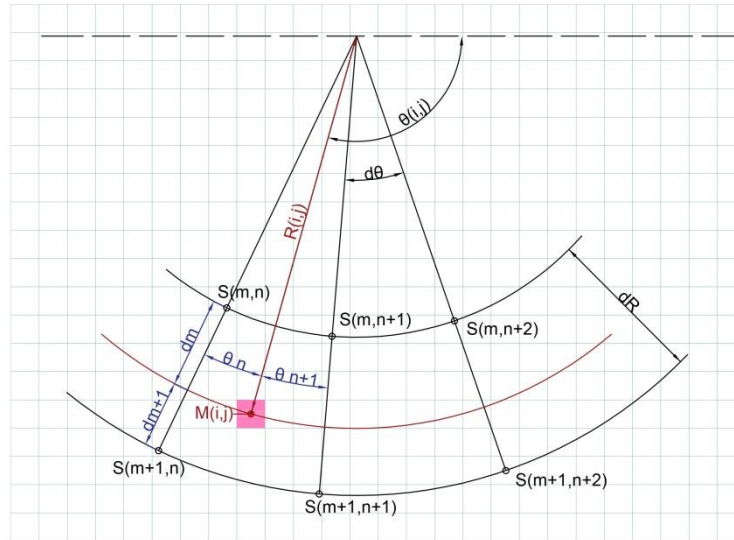


Figura 1: Esquema propuesto para la composición de imágenes.

### 2.1.1 Interpolación bilineal sin interfaz

Tomando como punto de partida una imagen de barrido angular (S-Scan), la matriz original de datos es convertida a una grilla de píxeles rectangulares (imagen de salida) empleando un traspaso de coordenadas polares a cartesianas.



**Figura 2:** Interpolación bilineal para un barrido angular sin interfaz.

El esquema de interpolación (Figura 2) evalúa la posición de las muestras  $S$  de la imagen adquirida con coordenadas  $(m, n)$ , al 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 que se aplicarán para interpolar la intensidad  $M$  correspondiente. En concreto, la interpolación bilineal sin interfaz se logra de la siguiente manera:

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

Calculando el peso  $P$  de cada muestra que interviene en el píxel de salida  $M$ , mediante una ponderación e interpolación primero en  $R$  y después en  $\theta$ :

$$P(m, n) = (d_{m+1}/dR)(\theta_{n+1}/d\theta) \quad (2)$$

$$P(m, n + 1) = (d_m/dR)(\theta_{n+1}/d\theta) \quad (3)$$

$$P(m + 1, n) = (d_{m+1}/dR)(\theta_n/d\theta) \quad (4)$$

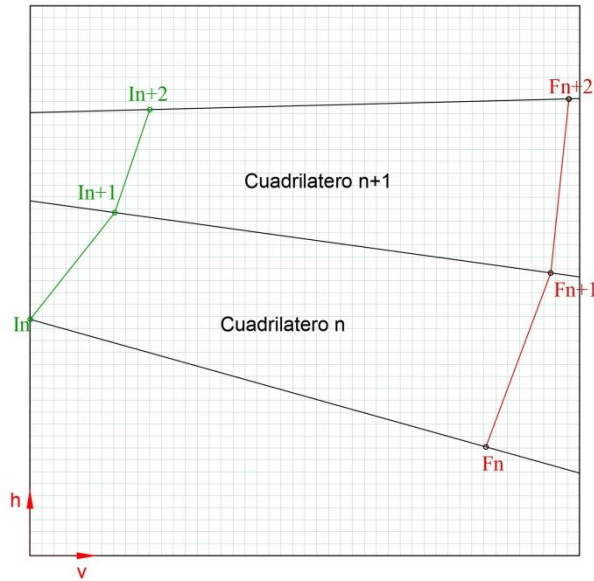
$$P(m + 1, n + 1) = (d_m/dR)(\theta_n/d\theta) \quad (5)$$

donde  $R$  es la distancia radial al píxel  $M$ ,  $dR$  es la separación entre muestras de una línea A-Scan, y  $\theta$  los ángulos de cada traza del barrido.

### 2.1.2 Interpolación bilineal con interfaz

Esta situación es muy habitual en los END industriales, pues por lo general se utilizan zapatas para producir cambio en el modo de propagación, 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 de geometría de la pieza. Estos escenarios de inspección presentan un cambio de fase (interfaz) entre el medio acoplante y el de la pieza, y es en la frontera de los materiales en donde se produce un cambio en la velocidad de propagación, con la consecuente reflexión y refracción del haz emitido (ley de Snell para ondas acústicas).

La interfaz hace que las líneas A-Scan de la imagen adquirida ya no tengan un único punto de origen como lo analizado en 2.1.1, sino que se traten de líneas rectas orientadas con una determinada dirección angular. Por lo tanto, el proceso de ubicación y ponderación de los pesos de las muestras más próximas se

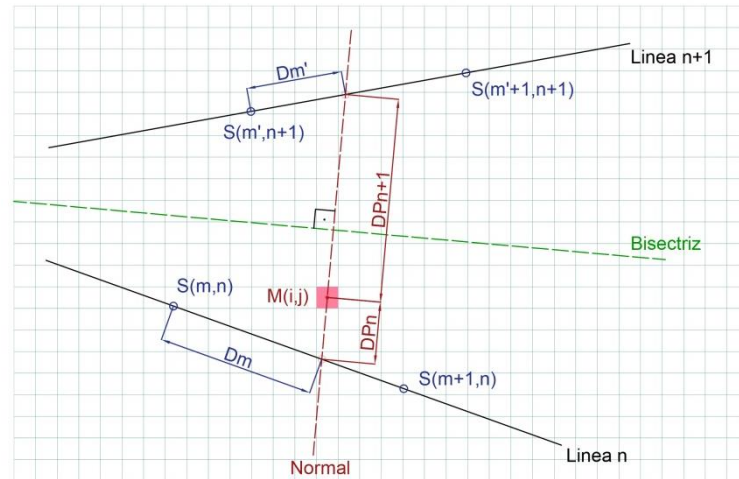


vuelve más complejo (Figura 3).

**Figura 3:** Grilla de píxeles y cuadrilátero formado por las líneas de barrido.

La ubicación de las trazas A-Scan sobre la grilla rectangular de salida se realiza encontrando los puntos de entrada en el material ( $I_i$ ). 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 [19]. 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 [20]. 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 [21]. 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.

Así, identificando los puntos iniciales  $I_i$  y finales  $F_i$  de cada traza A-Scan se establecen líneas auxiliares  $L_k$  que indican la posición de cada haz sobre la grilla de salida. Luego, para cada uno de los píxeles  $M$  de la imagen de salida comprendidos en cada cuadrilátero formado por dos líneas auxiliares contiguas, se 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 píxel de salida y que sea perpendicular a la bisectriz (Figura 4).



**Figura 4:** Interpolación bilineal con barrido angular e interfaz.

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

$$M(i, j) = S(m, n)P(m, n) + S(m + 1, n)P(m + 1, n) + S(m', n + 1)P(m', n + 1) + S(m' + 1, n + 1)P(m' + 1, n + 1) \quad (6)$$

Siendo  $S$  el valor de la señal de cada muestra y  $P$  sus pesos calculados de la siguiente forma:

$$P(m, n) = [DP_{n+1}/(DP_n + DP_{n+1})] \cdot [(dR - Dm)/dR] \quad (7)$$

$$P(m, n + 1) = [DP_{n+1}/(DP_n + DP_{n+1})] \cdot (Dm/dR) \quad (8)$$

$$P(m', n) = [DP_n/(DP_n + DP_{n+1})] \cdot [(dR - Dm')/dR] \quad (9)$$

$$P(m' + 1, n + 1) = [DP_{n+1}/(DP_n + DP_{n+1})] \cdot (Dm'/dR) \quad (10)$$

En donde  $dR$  es la separación entre dos muestras sucesivas de un A-Scan,  $DM$  es la separación entre la muestra y la intersección de la normal a la bisectriz con la línea auxiliar  $L$  de la muestra, y  $DP$  es la distancia entre la línea auxiliar  $L$  y la muestra de salida  $M$  sobre la bisectriz.

## 2.2 Suma coherente de las imágenes

La imagen de salida es una grilla de píxeles que tiene unas dimensiones establecidas por los límites máximos de la zona inspeccionada, y cada una de las  $q$  imágenes adquiridas sólo representan espacialmente una parte de la imagen de salida. En consecuencia, existen zonas con un elevado grado de solapamiento de información y otras en donde sólo unas pocas imágenes de entrada se superponen.

El método de interpolación bilineal se aplica, según el escenario de inspección, a cada una de las  $q$  imágenes adquiridas, y cada pixel  $M$  que se obtiene se ubica sobre la grilla de la imagen salida. Por tanto, aquellos píxeles  $M$  cuya información se superpone con otros por el solapamiento de puntos, requerirán de un método de combinación adecuado para no perder resolución o no empeorar la relación señal-ruido en la imagen final.

### 2.2.1 Búsqueda del método de combinación

La imagen de salida contiene píxeles 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 la media o el promedio de todas las amplitudes que contribuyen al pixel de la imagen de salida. 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 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 (Figura 5). 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 mínimos presenta una leve mejoría en la relación señal-ruido que las otras opciones, mientras 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.

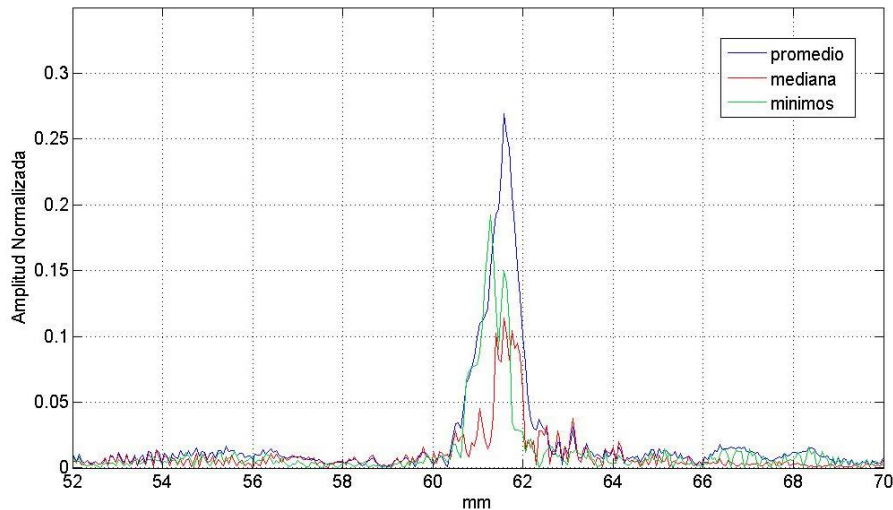


Figura 5: Patrones laterales obtenidos de un reflector puntual empleando distintos métodos de combinación.

### 2.2.2 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 como parámetro de control. La separación entre aperturas, expresadas en mm o en número pitch (separación entre dos elementos piezoeléctricos 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 de 1,5 mm de diámetro inmerso en agua (sin interfaz), se pueden obtener distintas curvas con el porcentaje de reflectores resueltos (esto es, lograr que la señal de los reflectores superen la amplitud del 35%) en una composición de N imágenes B-Scans, separadas por 1, 2, 3, 4.5 ó 6 mm. 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 el 100% de los reflectores.

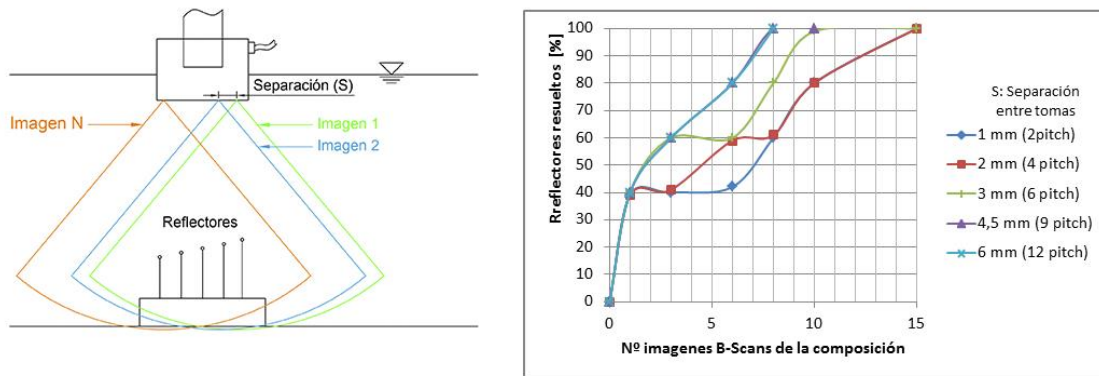


Figura 6: Izquierda: esquema de ensayo. Derecha: efecto de la separación entre imágenes y la respuesta que se obtienen de 5 reflectores.

### 3. RESULTADOS

Las ecuaciones (1) y (6) que establecen la interpolación bilineal (con y sin interfaz) fueron implementadas en Matlab para su verificación. Por cada imagen de entrada, el algoritmo entrega los valores de los píxeles que deben ser colocados en la imagen de salida. Los píxeles interpolados que se solapan con otros en la imagen de salida son combinados tomando el promedio de todas las amplitudes que le contribuyen, siguiendo los lineamientos analizados en las secciones 2.1 y 2.2.

En todas experimentaciones, las imágenes fueron capturadas empleando un sistema de Phased Array SITAU-311 de 32 canales activos multiplexados a 128 elementos (DASEL, España), configurando el barrido electrónico más adecuado para cubrir parte de una región de interés desde distintas posiciones y direcciones angulares, a fin de generar una imagen que contenga la información espacial coherente de todas las capturas.

#### 3.1 Ensayos sin interfaz

##### 3.1.1 Reflectores en inmersión

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 (Imasonic, Francia). En el caso de la interpolación sin interfaz, se utilizó agua desgasificada como medio de propagación en donde se colocaron 5 reflectores que emulan reflectores esféricos de 1 mm de diámetro. La longitud de onda ( $\lambda$ ) en agua  $\lambda = c/f \approx 0.3$  mm, siendo  $c = 1.48$  mm/ $\mu$ s la velocidad de propagación (Figura 7).

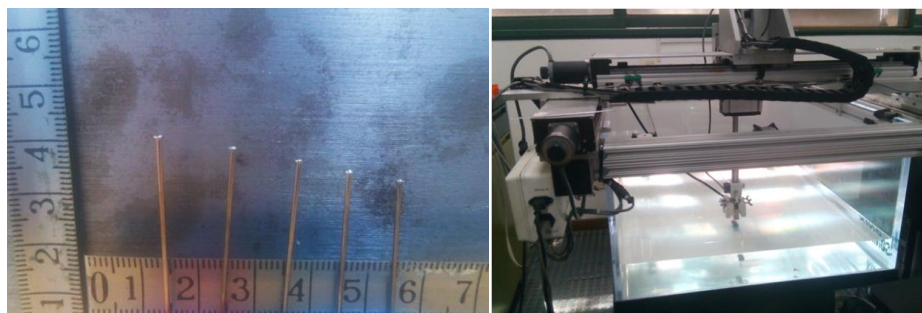


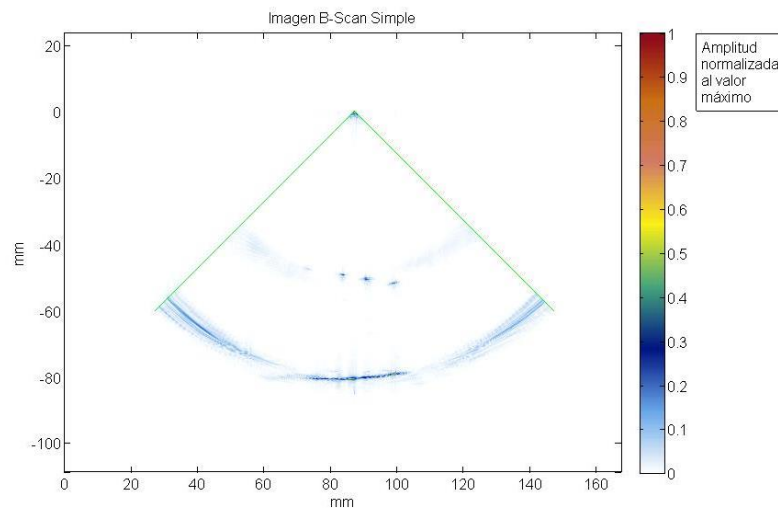
Figura 7: Izquierda: arreglo para obtener reflectores esféricos a diferentes profundidades. Derecha: transductor y probeta en condiciones de inmersión.

Las imágenes de entrada fueron realizadas empleando una apertura activa de 32 elementos, con una ganancia de 24 db, una frecuencia de muestreo de 40 MHz y utilizando un barrido sectorial comprendido



entre  $\pm 45^\circ$ . El centro de la apertura activa de cada imagen de entrada se fue desplazando cada 0.5mm (o 1 pitch) 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 a todos los reflectores, los que se encuentran más próximos al transductor no terminan siendo bien resueltos (Figura 8).

Considerando tan solo diez imágenes S-Scan separadas a 4.5 mm (equivalente a una distancia de 9 pitch) entre los centros de las aperturas activas, se puede observar que, dependiendo de la posición, algunos reflectores se ven más favorecidos que otros. Por lo tanto, en ninguna de las imágenes se pueden resolver simultáneamente los cinco reflectores (Figura 9). Luego, al interpolar las 10 imágenes mediante el algoritmo propuesto en (1) y componer los píxeles de salida empleando el promedio de sus intensidades, se obtiene una imagen final de mejor relación señal-ruido y mayor contraste que las capturas individuales, en donde los 5 reflectores quedan bien definidos (Figura 10).



**Figura 8:** Imagen S-Scan con un barrido entre  $\pm 45^\circ$  con una apertura activa de 32 elementos

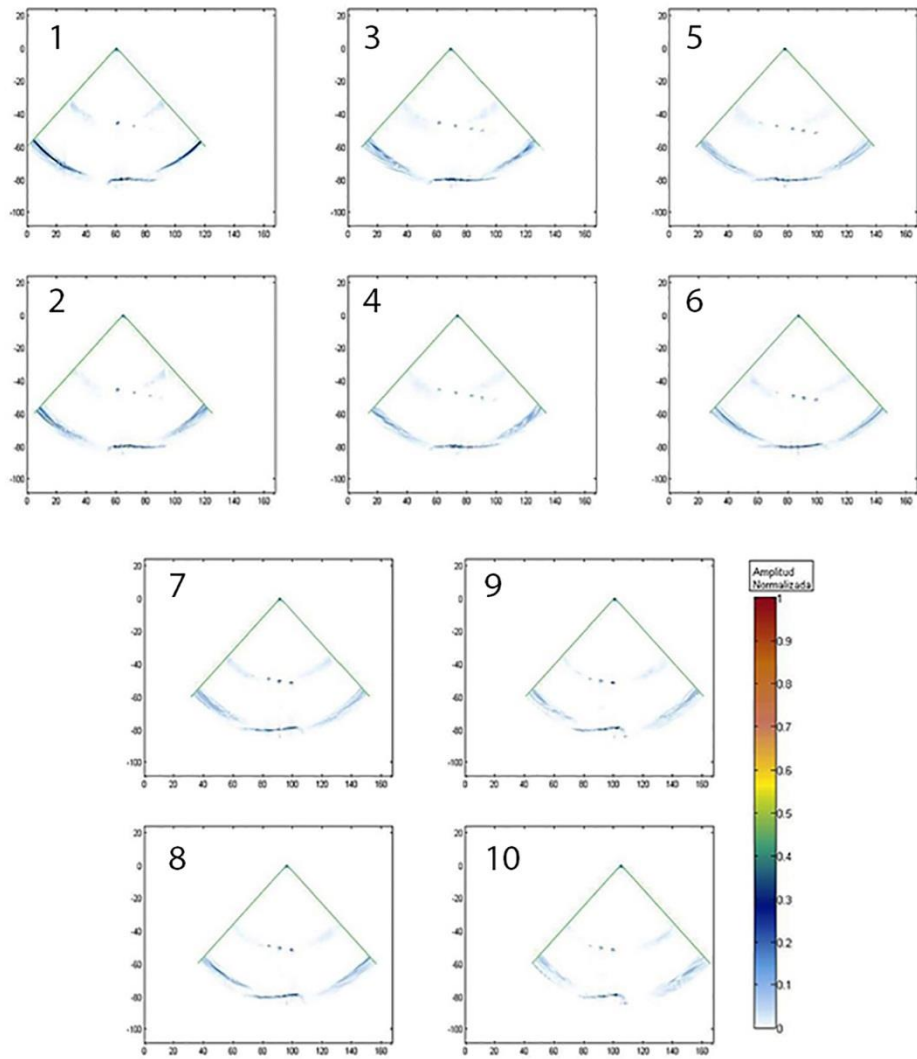
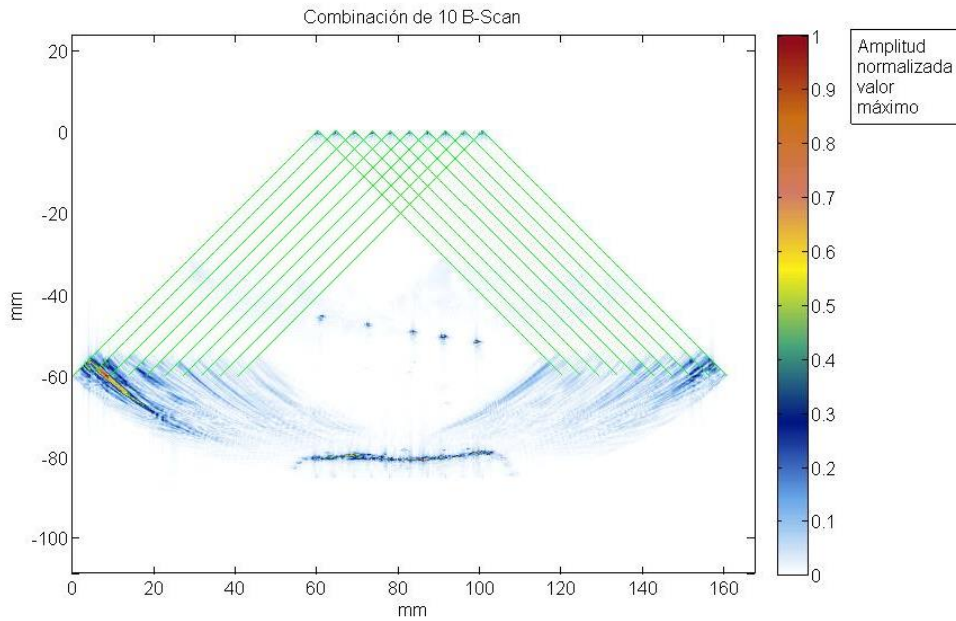


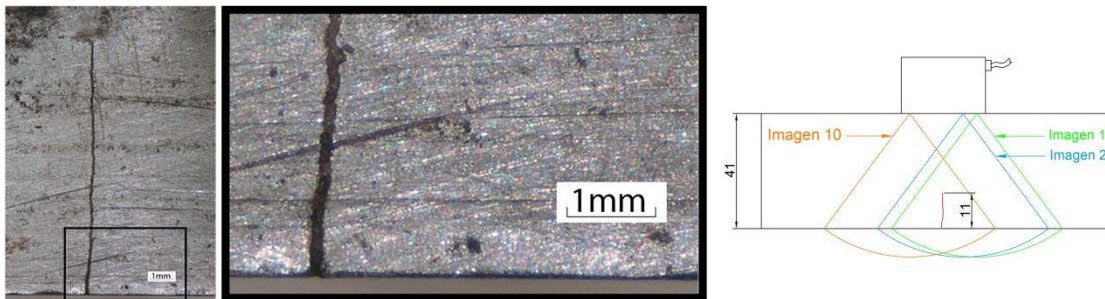
Figura 9: Imágenes S-Scan obtenidas al desplazar la posición de la apertura en 4.5 mm hacia la derecha.



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

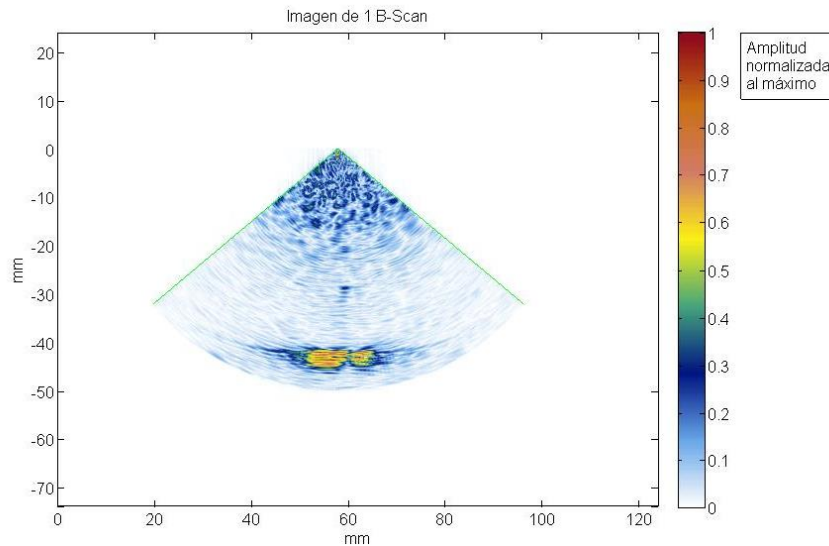
### 3.1.2 Ensayo por contacto

En un segundo experimento se utilizó una probeta de acero en contacto con el mismo array de 5MHz. El bloque de 41 mm de espesor fabricado en acero al carbono AISI-SAE 1045 (velocidad longitudinal  $c_l = 5,89$  mm/ $\mu$ s), contiene una fisura formada por mecanismo de fatiga, con una abertura menor a 0.1 mm y una profundidad de 11 mm desde el fondo de la pieza (Fig. 11).



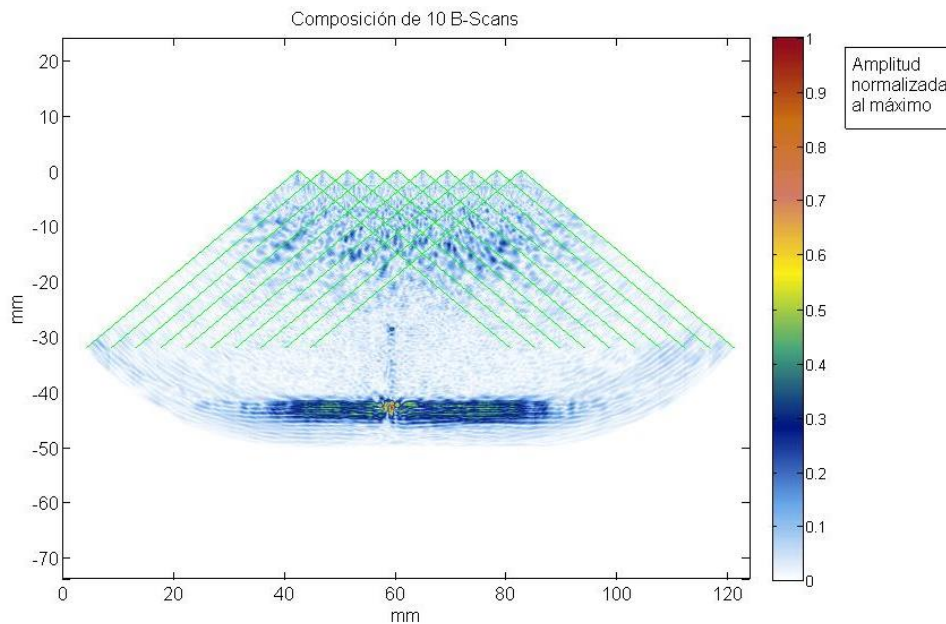
**Figura 11:** Izquierda: imagen de la fisura de fatiga estudiada. Derecha: esquema de para la experimentación.

El objetivo de este ensayo es verificar si además de observar la punta de la entalla, que se comporta como un emisor puntual por el efecto de difracción (Figura 12), es posible distinguir las paredes y su orientación, aprovechando la diversidad espacial que ofrece una serie de adquisiciones de la fisura desde distintas posiciones.



**Figura 12:** 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 a 9 pitch, con un rango angular comprendido entre  $\pm 45^\circ$ , empleando una apertura activa de 32 elementos, con una ganancia de 55 db y una frecuencia de muestreo de 40 MHz (Figura 11). En la imagen resultante de la composición de los 10 barridos S-Scans se observan tanto la base de la entalla como el extremo superior de forma clara y hasta puede distinguirse, con menor intensidad, las paredes de la fisura (Figura 13).



**Figura 13:** Imagen resultante de la composición coherente de 10 S-Scans de la fisura de fatiga.

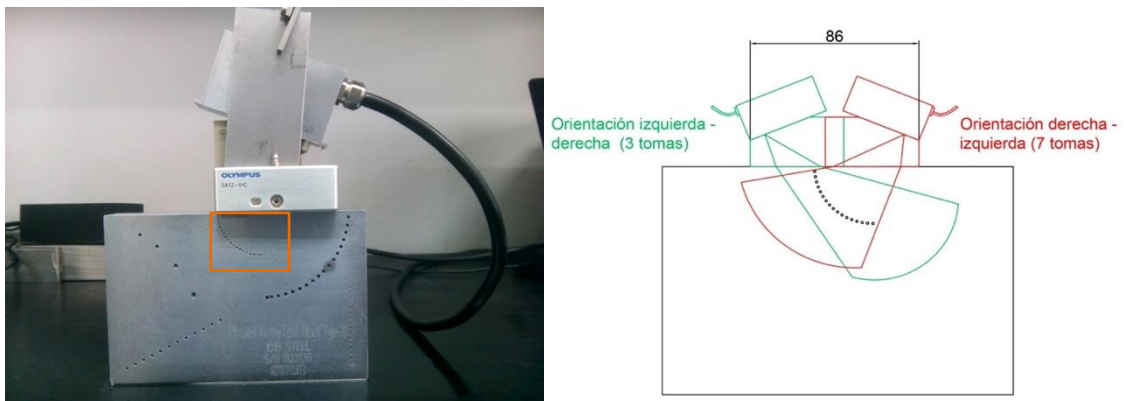
### 3.2 Ensayos con interfaz

Finalmente, se experimentó 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.), en la que se montó el *array* disponible de 5 MHz (Figura 14). Este escenario de ensayo requiere considerar la interfaz entre el plástico y la pieza y aplicar el método de composición de imágenes basado en la interpolación en donde las líneas de barrido ya no confluyen desde un único origen.



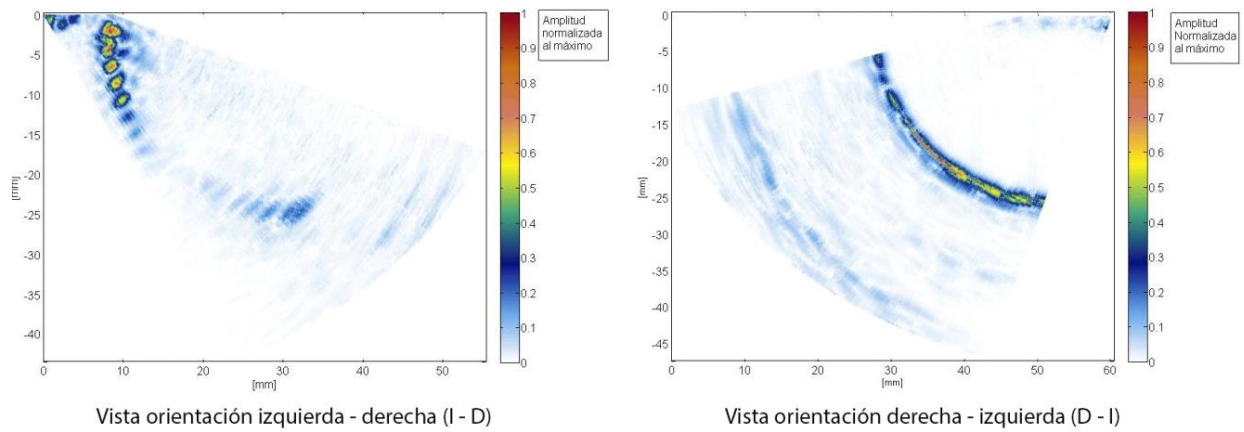
**Figura 14:** Montaje realizado para adaptar la zapata al transductor.

Las imágenes a componer fueron adquiridas sobre un mismo plano empleando barridos electrónicos angulares comprendidos entre  $30^\circ$  y  $70^\circ$ , con diferentes orientaciones del haz. La posición de la apertura activa de 32 elementos se desplazó dentro del array. La experimentación se realizó sobre un bloque patrón para PA modelo Test Block Type B (SIUI, China) construido en acero AISI-SAE 1018, considerando 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 15). Estos taladros no pueden ser resueltos con único barrido sectorial, ya que los reflectores están muy próximos entre sí y están al límite de la resolución angular de la apertura activa utilizada (Figura 16).



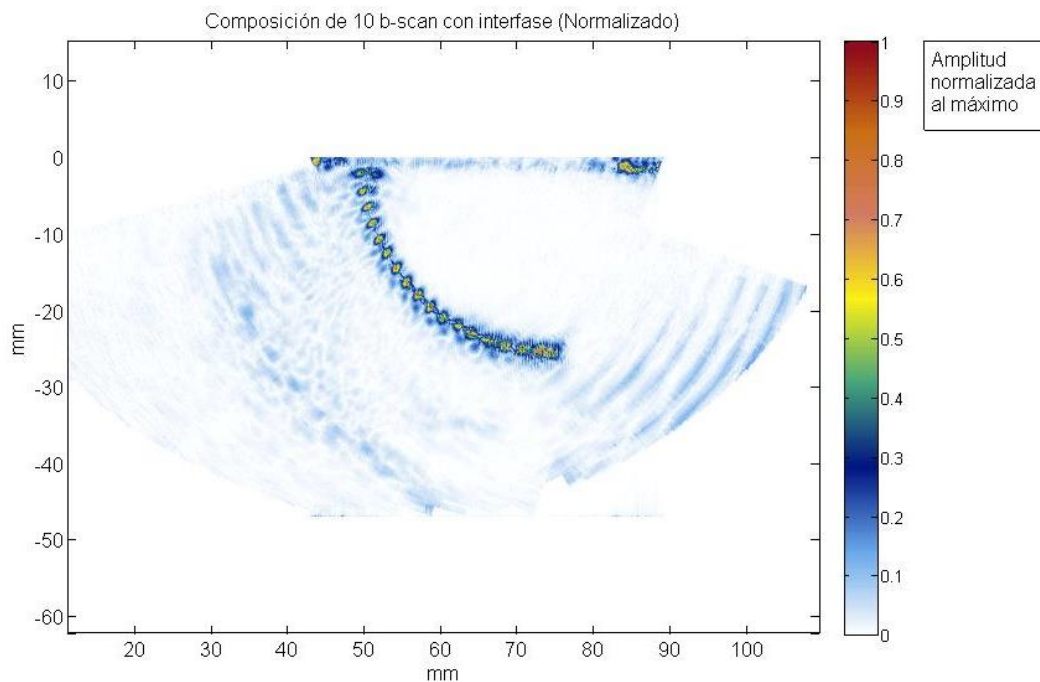
**Figura 15:** Izquierda: montaje de *array* y cuña sobre el “Test Block Type B” y región de interés. Derecha: esquema del ensayo realizado con la zapata.

En este caso, la verificación y respuesta del algoritmo se elaboró adquiriendo dos grupos de múltiples imágenes con diferentes rangos angulares y orientaciones, el primero grupo consistió en tres imágenes con orientación izquierda-derecha (para lograr 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 con una orientación contraria (derecha-izquierda). Por otro lado, los puntos de entrada de cada línea de barrido que requiere el algoritmo se obtuvieron del sistema SITAU, ya que implementa la técnica de Autoenfoco comentada previamente.



**Figura 16:** Imágenes S-Scan tomadas desde distintos puntos y con distinta orientación, de los taladros seleccionados para la experimentación dentro del “Test Block Type B”. Observar en la imagen que el origen de los haces no es común como en los ensayos sin interfaz.

Al efectuar la composición de las dos series de capturas efectuadas, se logra aprovechar la diversidad espacial que ofrecen en una única imagen de salida. En la composición resultante se pueden distinguir casi la totalidad de los taladros que contiene la región de interés seleccionada (Figura 17).



**Figura 17:** Imagen compuesta del “Test Block Type B” a partir de la captura de 3 barridos S-Scans con orientación izquierda-derecha y de 7 S-Scans con orientación derecha-izquierda.

#### 4. CONCLUSIONES

La composición espacial y coherente de múltiples imágenes ha demostrado que tiene gran potencial de aplicación en los END industriales, ya que mejora la detección de defectos y aumenta el potencial de la información que proporciona la tecnología de Phased Array. 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 distintas orientaciones y posiciones en una única imagen, permitiendo detectar y evaluar defectos, aun cuando estos poseen una orientación o distribución geométrica compleja. A su vez la posibilidad de

concentrar la información mediante la superposición de imágenes sobre la zona de interés permite mejorar la relación señal-ruido y realzar el contraste de la imagen, debido a que mientras la intensidad de los reflectores (como ser fisuras, defectos, cambios de fase) se mantiene toma a toma, el ruido mantiene su aleatoriedad. Por tanto, se logra una disminuir el ruido de fondo en el valor final promediado, obteniendo así una imagen de calidad superior y precisa.

## 5. AGRADECIMIENTOS

Trabajo desarrollado en el Departamento de Ensayos no Destructivos y Estructurales de la CNEA, financiado con el apoyo de la CNEA, el Instituto Sábato y de la ANPCyT bajo el marco del proyecto de investigación PICT-2014-1768.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] POGUET, J., GARCIA, A., VAZQUEZ, J., *et al.*, “Phased Array Technology. Concepts, probes and applications”, In: *8th European Congress on Non Destructive Testing*, pp. 1–7, 2002.
- [2] NANEKAR, P.P., SHAH, B. K. “Characterization of Material Properties by ultrasonics”, *Natl. Semin. Non-Destructive Eval.*, n. 249, pp. 25–38, 2003.
- [3] SATYANARAYAN, L., SRIDHAR, C., KRISHNAMURTHY, C. V., *et al.*, “Simulation of ultrasonic phased array technique for imaging and sizing of defects using longitudinal waves”, *Int. J. Press. Vessel. Pip.*, v. 84, n. 12, pp. 716–729, 2007.
- [4] WOOH, S.-C., SHI, Y. “Influence of phased array element size on beam steering behavior”, *Ultrasonics*, v. 36, pp. 737–749, 1998.
- [5] P. D. W. Bruce W. Drinkwater, “Ultrasonic arrays for non-destructive evaluation: A review,” *NDT E Int.*, v. 39, n. 7, pp. 525–541, 2006.
- [6] LEE, J. H., CHOI, S. W. “A parametric study of ultrasonic beam profiles for a linear phased array transducer.”, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, v. 47, n. 3, pp. 644–50, 2000.
- [7] SONG, S. J., SHIN, H. J., JANG, Y. H. “Development of an ultra sonic phased array system for nondestructive tests of nuclear power plant components”, *Nucl. Eng. Des.*, v. 214, n. 1–2, pp. 151–161, 2002.
- [8] FATEMI, M., KAK, A. C. “Ultrasonic B-scan imaging: Theory of image formation and a technique for restoration”, *Ultrason. Imaging*, v. 2, n. 1, pp. 1–47, 1980.
- [9] SHATTUCK, D. P., VON RAMM, O.T. “Compound scanning with a phased array”, *Ultrason. Imaging*, v. 4, pp. 93–107, 1982.
- [10] BERSON, M. “Compound scanning with an electrically steered beam”, *Ultrason. Imaging*, v. 3, n. 3, pp. 303–308, 1981.
- [11] JESPERSEN, S. K., WILHJELM, J. E., SILLESEN, H. “Multi-Angle Compound Imaging”, *Ultrason. Imaging*, v. 20, pp. 81–102, 1998.
- [12] MONTALDO, G., TANTER, M., BERCOFF, J., *et al.*, “Coherent plane-wave compounding for very high frame rate ultrasonography and transient elastography”, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, v. 56, n. 3, pp. 489–506, 2009.
- [13] Entekin, R.R., PORTER, B. A., SILLESEN, H. H., *et al.*, “Real-time spatial compound imaging: Application to breast, vascular, and musculoskeletal ultrasound”, *Semin. Ultrasound CT MRI*, v. 22, n. 1, pp. 50–64, 2001.
- [14] ROHLING, R., GEE, A., BERMAN, L. “Three-dimensional spatial compounding of ultrasound images”, *Med. Image Anal.*, v. 1, n. 3, pp. 177–193, 1997.
- [15] KANG, H. J., BELL, M. A. L., GUO, X., *et al.*, “Spatial Angular Compounding of Photoacoustic Images”, *IEEE Trans. Med. Imaging*, v. 35, n. 8, pp. 1845–1855, 2016.
- [16] CINCOTTI, G., LOI, G., PAPPALARDO, M. “Frequency decomposition and compounding of ultrasound medical images with wavelet packets”, *IEEE Trans. Med. Imaging*, v. 20, n. 8, pp. 764–771, 2001.
- [17] EREZ, Y., SCHECHNER, Y. Y., ADAM, D. “Ultrasound Image Denoising by Spatially Varying Frequency Compounding”, In: *Joint Pattern Recognition Symposium*, pp. 1–10, 2006.
- [18] PARKER, J. A., KENYON, R. V., TROXEL, D. E. “Comparison of interpolation methods for image resampling”, *IEEE Trans. Med. Imaging*, v. 2, n. 1, pp. 31–39, 1983.

- [19] CAMACHO, J., CRUZA, J. F., BRIZUELA, J., *et al.*, “Automatic dynamic depth focusing for NDT”, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, v. 61, n. 4, pp. 673–684, 2014.
- [20] FRITSCH, C., CAMACHO, J., MORENO, J. M., *et al.*, “Array virtual para cálculo de leyes focales”, In: *42º Congreso Español de Acústica*, pp. 1–7, 2011.
- [21] FRISTCH, L., CRUZA, F., *et al.*, *Controlador de enfoque dinámico para sistemas de imagen ultrasónica*, 2012.