

AUTOFOCUS: ENFOQUE AUTOMÁTICO PARA PHASED ARRAYS

J. F. Cruza¹, J. Camacho¹, C. Fritsch¹, R. González-Bueno², R. Giacchetta²

¹ ITEFI-CSIC, c/Serrano 144, 28006 Madrid, carlos.f@csic.es

² DASEL, S.L., Av. Madrid 84, 28500 Arganda, Madrid, ricardo@daselsistemas.com

RESUMEN

La inspección con phased arrays requiere definir el conjunto de leyes focales en emisión y recepción que dependen de la geometría y de las velocidades de propagación en acoplante y pieza. Para su cálculo suelen utilizarse programas de simulación junto a descripciones CAD de la geometría.

La tecnología AUTOFOCUS aquí presentada estima automáticamente la geometría array-pieza y determina las leyes focales óptimas para enfoque dinámico (DDF). Opera de forma transparente y obtiene imágenes enfocadas a todas las profundidades, optimizadas para la posición actual de transductor y pieza. AUTOFOCUS hace innecesaria la descripción CAD y/o el uso de programas auxiliares de cálculo de leyes focales. También es muy rápido: realiza todo el proceso en apenas 0.2 segundos para arrays de hasta 128 elementos e imágenes con más de 100 líneas. El trabajo describe sus fundamentos y presenta algunos resultados experimentales.

ABSTRACT

Phased array inspections require defining the emission and reception focal laws that are function of geometry and propagation velocities in the coupling and in the component. They are usually computed using simulation software together with CAD descriptions of the geometry.

AUTOFOCUS technology automatically estimates the array-part geometry and computes the optimal focal law set for dynamic depth focusing (DDF). Its operation is transparent and obtains images focused at all depths optimized for the actual transducer-part position. AUTOFOCUS makes CAD descriptions and/or auxiliary focal law computing software unnecessary. It is also very fast: the whole process takes less than 0.2 seconds for 128-element arrays and more than 100 image lines. This work describes its foundations and presents some experimental results.

Palabras clave (keywords): autofocus, dynamic depth focusing, DDF, phased array, leyes focales, NDT, END, autoenfoque.

1. INTRODUCCIÓN

La tecnología *phased array* se ha incorporado con fuerza al ámbito de la Evaluación No Destructiva por ultrasonidos por las importantes ventajas que proporciona: imágenes adquiridas en tiempo real, capacidad de modificar el foco y ángulo de deflexión, operación con ondas transversales o longitudinales, mejoras de resolución y sensibilidad, etc.

Sin embargo, los *phased arrays* también presentan algunas dificultades por las diferencias que existen con la tecnología convencional de palpadores mono-elemento. No tanto en cuanto a interpretación y evaluación de resultados (donde la tecnología *phased array* es claramente superior), como en relación con la preparación de la inspección.

En efecto, los sistemas *phased array* requieren la definición y programación de leyes focales o retardos de enfoque en emisión y recepción. Si se opera con una cuña estándar, el problema se reduce a colocar adecuadamente los focos, pues el propio sistema evalúa las leyes focales, al menos para foco fijo. Pero, con frecuencia, la inspección se realiza por inmersión (local o total) debido a la geometría compleja de la pieza o a la realización de barridos sin contacto transductor-pieza.

En estas condiciones el problema de determinar, no sólo la posición de los focos sino, sobre todo las leyes focales, no es trivial. Requiere evaluar los tiempos de vuelo del ultrasonido desde cada elemento a cada foco en la pieza contando con la refracción en la interfaz. Los programas de cálculo de leyes focales (simuladores, etc.) requieren conocer geometría array-pieza con buena precisión. Un error geométrico de tan sólo 0.1 mm, por ejemplo, produce desfases que pueden arruinar el enfoque; una desviación angular del array de 1° hace que se ubiquen erróneamente los defectos en varios milímetros [1]. Obviamente el problema es mayor con enfoque dinámico (Dynamic Depth Focusing, DDF), que es la técnica que proporciona la mejor imagen, siempre que las leyes focales dinámicas estén correctamente evaluadas (errores inferiores a 1/10 periodos de señal en cada foco).

Este trabajo presenta la tecnología SITAU-AUTOFOCUS, que supera tales inconvenientes mediante la realización automática del siguiente proceso:

1. Estimación automática de la geometría array-pieza actual por medio de algunas medidas ultrasónicas. La pieza puede ser de forma arbitraria y estar ubicada en cualquier posición respecto al array.
2. Determinación de las leyes focales óptimas para realizar el enfoque dinámico DDF estricto (esto es, muestra a muestra). Se calculan y programan automáticamente sin intervención del operador.
3. Generación continua de imágenes con enfoque dinámico hasta que se desee repetir el proceso de autoenfoco (que puede ser periódico).

Con esta estrategia se obtienen numerosas ventajas, destacando:

- a) El operador queda liberado de determinar la posición de los focos y de suministrar una descripción geométrica de la pieza y transductor.

- b) Se obtiene la imagen óptima para la actual posición array-pieza, lo que maximiza la sensibilidad y ubica correctamente las indicaciones.
- c) En inspecciones con barrido, es innecesario pre-calcular y almacenar las leyes focales adaptadas a los cambios geométricos. Basta con ejecutar un autoenfoco cuando se produzcan tales cambios.
- d) Es mucho más rápido que el tiempo invertido en calcular y programar las leyes focales mediante programas auxiliares. AUTOFOCUS realiza todo el proceso en apenas 0.2 segundos.
- e) Las imágenes generadas están correctamente enfocadas a todas las profundidades, aunque pueden obtenerse también con foco fijo.
- f) AUTOFOCUS no requiere sondas especiales. Opera con cualquier array en inmersión o con suelas/cuñas sólidas.

Este trabajo describe los fundamentos y componentes de AUTOFOCUS, así como las estrategias seguidas para calcular las leyes focales adaptadas teniendo en cuenta los efectos de la refracción en la interfaz. Finalizamos mostrando algunos ejemplos experimentales.

2. ESTIMACIÓN AUTOMÁTICA DE LA GEOMETRÍA

La figura 1.a muestra un ejemplo genérico en el que se desea inspeccionar una pieza de geometría desconocida, por inmersión, con un array de N elementos y paso d . Se suponen conocidas las velocidades de propagación en el acoplante (c_1) y en el material de la pieza (c_2). El operador desea adquirir una imagen sectorial entre los ángulos θ_1 y θ_2 con la normal (n) con cierto intervalo angular entre líneas. No es necesario proporcionar ningún otro parámetro. Análogamente, se podría definir un barrido lineal.

Para estimar la geometría se mide la distancia desde cada elemento del array a la superficie por pulso-eco. Considerando emisión omnidireccional dado el pequeño tamaño del elemento, cada medida del tiempo de vuelo T_i define una circunferencia con centro en el elemento i , radio $R_i = c_1 T_i / 2$ que es tangente a la interfaz en A (figura 1.b). Se tiene:

$$\sin \varphi_i = \frac{R_i - R_{i+1}}{d} = \frac{c_1}{2d} (T_i - T_{i+1}) \quad (1)$$

donde se ha supuesto que los segmentos R_i y R_{i+1} son paralelos. Esta hipótesis se cumple si el radio de curvatura de la interfaz es mucho mayor que la distancia entre elementos d , como es habitual.

Si el elemento i del array está en las coordenadas (x_i, z_i) , el punto A en la interfaz se ubica en:

$$\begin{aligned} x_{Ai} &= x_i + R_i \sin \varphi_i \\ z_{Ai} &= z_i - R_i \cos \varphi_i \end{aligned} \quad (2)$$

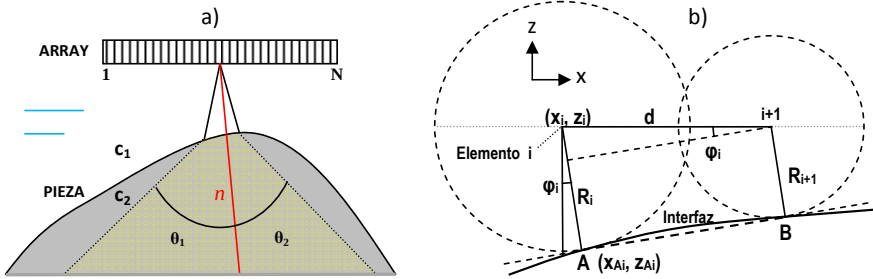


Figura 1. a) Esquema genérico de inspección con barrido sectorial por inmersión de una pieza de geometría arbitraria; b) Medida de la interfaz

De este modo, con cada disparo de un elemento del array en pulso-eco, se obtienen las coordenadas de un punto de la interfaz. En general, con N disparos se obtienen $N-1$ puntos. Para realizar estas medidas, se programa un barrido lineal con una apertura activa de 1 elemento. Puede acelerarse el proceso con un paso de barrido de varios elementos, reduciendo el número de disparos así como el número de puntos registrados de la interfaz. En [2] describimos también otras alternativas con menor número de disparos.

En general (geometría arbitraria), las $N-1$ coordenadas obtenidas de (1) y (2) se ajustan por mínimos cuadrados a un polinomio de grado $p < N-1$. En la práctica, para interfaces suavemente curvadas, $1 \leq p \leq 4$. Por otra parte, si se sabe que la pieza es cilíndrica, el ajuste se realiza a una circunferencia, determinando radio y coordenadas del centro. Si se conoce que la interfaz es plana, se limita el polinomio a uno de primer grado. Con este proceso, desarrollado a partir de las medidas obtenidas, se obtiene una representación analítica de la interfaz en forma de función $z=f(x)$.

3. EL PROBLEMA DE LA REFRACCIÓN: EL ARRAY VIRTUAL

Pero, incluso conociendo analíticamente la geometría de la interfaz, queda por resolver el problema que plantea la refracción. Convencionalmente se utiliza el principio de Fermat: para cada foco y elemento, hay que determinar el punto de entrada en la interfaz del rayo que presente el menor tiempo de vuelo, considerando los recorridos en cada medio. Salvo para el caso de una interfaz plana (resolver ecuación de 4º grado), no existen fórmulas cerradas y hay que proceder con métodos numéricos iterativos.

Nuestra aproximación al problema es diferente. Encontramos que es posible obtener un *array virtual* casi equivalente al real en tiempos de vuelo, pero que sólo opera en el segundo medio [3]. De este modo, el array virtual obvia por completo los problemas de la refracción pues opera en un medio homogéneo. Cada línea de la imagen tiene su propio array virtual.

La figura 2 muestra los arrays virtuales obtenidos para los ángulos de deflexión extremos en un barrido sectorial de -50° a $+50^\circ$ de una pieza de aluminio ($c_2 = 6.2 \text{ mm}/\mu\text{s}$) inspeccionada por inmersión ($c_1 = 1.5 \text{ mm}/\mu\text{s}$) y geometría arbitraria.

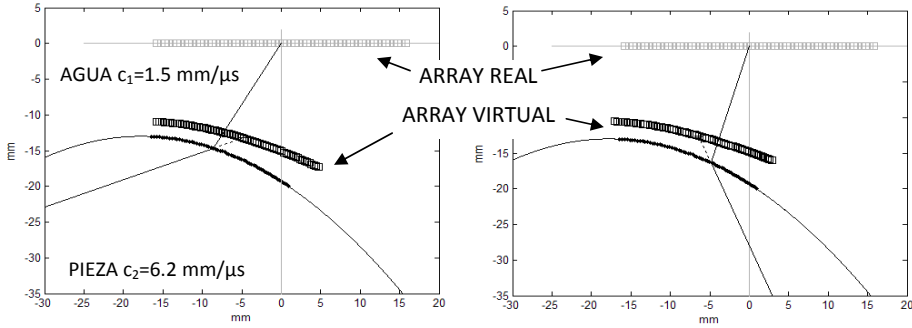


Figura 2. Array virtual para una pieza de geometría arbitraria y dos líneas extremas de un barrido de -50° a $+50^\circ$ respecto a la normal en cada punto.

El array real (5 MHz) tiene 64 elementos con $d=0.5$ mm. Sobre la interfaz se representan los puntos detectados con la técnica pulso-eco descrita. El array virtual calculado tiene también 64 elementos y el tiempo de vuelo cuasi-equivalente desde cada elemento i a cada foco en (x_F, z_F) se calcula a partir del elemento virtual en (x_{Vi}, z_{Vi}) mediante:

$$t_{iF} = \frac{1}{c_2} \sqrt{(x_{Vi} - x_F)^2 + (z_{Vi} - z_F)^2} + t_k \quad (3)$$

donde t_k es una constante que devuelve el calculador del array virtual. La figura 3 muestra el error absoluto en los tiempos de vuelo calculados con el array virtual respecto a los obtenidos con un proceso iterativo de Fermat. Se observa que son inferiores a 4 ns a partir de los 8 mm de la interfaz.

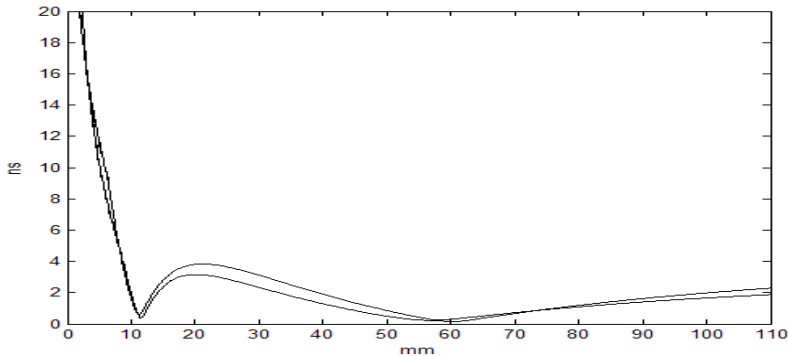


Figura 3. Errores temporales absolutos del array virtual equivalente

4. ENFOQUE DINÁMICO EN TIEMPO REAL POR HARDWARE

El proceso anterior debería repetirse para cada foco en cada línea, con el fin de obtener una imagen con enfoque dinámico en profundidad. Sin embargo, un tercer aspecto de AUTOFOCUS evita estos cálculos mediante un hardware específico que calcula los instantes de adquisición de las señales recibidas por cada elemento para corregir el enfoque muestra a muestra.

La idea deriva de un trabajo nuestro anterior, en el que encontramos que el instante de muestreo siguiente en un determinado canal debe ser un periodo de muestreo (T_s) o algo menor, $T_s(1-1/\nu)$ con $\nu > 1$, para mantener enfocado el haz a lo largo de su propagación [4]. El método, llamado "*Corrección Focal Progresiva*", garantiza errores inferiores a T_s/ν y fue la base del enfoque dinámico realizado en la primera generación de la tecnología SITAU (la primera comercial en disponer enfoque dinámico para aplicaciones de END).

Extendimos esta idea para operar con el array virtual, desarrollando un circuito que realiza automáticamente la Corrección Focal Progresiva a partir de un par de parámetros de inicialización. Estos circuitos han sido incorporados a la segunda generación de la tecnología phased array SITAU. De este modo se evita calcular las leyes focales para cada muestra: Basta determinar dos parámetros iniciales mediante una formulación cerrada para que el circuito realice el enfoque dinámico con un error temporal inferior a T_s/ν . Puesto que la frecuencia de muestreo será, al menos, 4 veces la de la señal (criterio de Nyquist en banda ancha), con $\nu=8$ el circuito garantiza errores de enfoque inferiores a $1/32$ el periodo de la señal, garantizando un enfoque correcto muestra a muestra (enfoque dinámico estricto). El enfoque dinámico estricto se diferencia de otras aproximaciones que sólo permiten definir un número limitado de focos en cada A-scan.

5. OPERACIÓN Y VERIFICACIÓN

Tras definir los parámetros principales de la inspección (profundidad, ángulos, etc.), al ejecutar "AUTOFOCUS" el sistema desencadena el proceso descrito: estimación de la interfaz, array virtual y programación de los parámetros iniciales de enfoque. A partir de este momento el sistema adquiere la imagen con enfoque dinámico estricto de forma continua hasta que se desee modificar las leyes focales mediante una nueva operación de autoenfoque.

Para la realización de los experimentos se utilizó un array de Imasonic (Besançon, Francia) de 5 MHz, $N=128$ elementos y paso $d=0.6$ mm. El sistema utilizado SITAU-FP-AF 128 (Dasel, S.L., Madrid) se configuró para diferentes modalidades de barrido, con una frecuencia de muestreo de 40 MHz y haciéndolo operar en modo AUTOFOCUS. Todos los experimentos se realizaron por inmersión en agua.

La figura 4 muestra un primer ejemplo, obtenido con AUTOFOCUS aplicado a la inspección en inmersión de una pieza cilíndrica de aluminio de 50 mm de diámetro con 3 parejas de taladros laterales, ubicado a una distancia desconocida del array. Se supuso conocida la geometría, pero no así el diámetro ni la posición de la pieza y se configuró el ajuste de la interfaz a una circunferencia. El error geométrico eficaz obtenido de múltiples medidas del diámetro con la técnica pulso-eco fue inferior a 10 μm .

Se programó un barrido angular entre -55° y $+55^\circ$ con un intervalo de 0.5° entre líneas, utilizando 32 elementos en emisión y recepción. Se situó el foco de emisión a 10 mm de la interfaz y se operó con enfoque dinámico (DDF) en recepción.

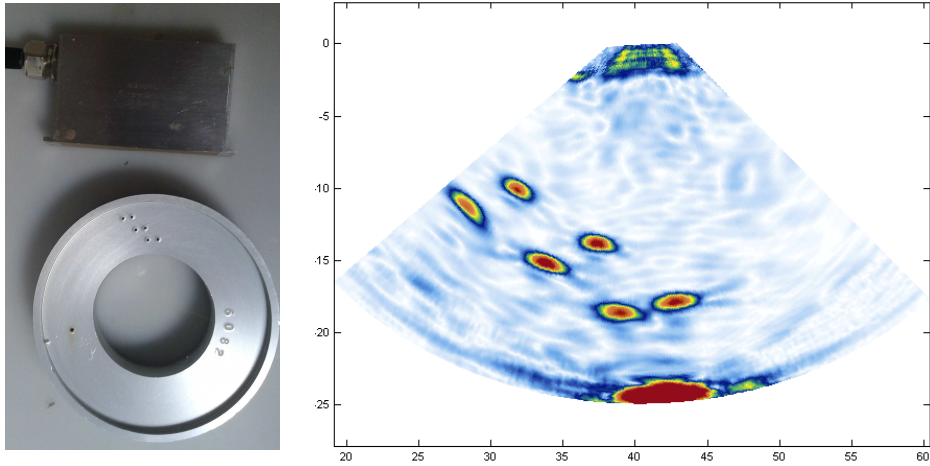


Figura 4. Inspección con AUTOFOCUS de una pieza circular de aluminio con barrido angular entre -55° y $+55^\circ$. Izquierda: esquema, Derecha: imagen.

La figura 4.derecha muestra la imagen obtenida, donde son claramente visibles los taladros y el eco de fondo. Otras indicaciones residuales de menor amplitud son consecuencia de reverberaciones internas y cambios de modo en la interfaz. La resolución lateral es la esperada con el array descrito a la profundidad de los defectos, lo que indica un correcto enfoque en toda la imagen.

En un segundo ejemplo situamos otra pieza de geometría supuestamente desconocida en una posición aleatoria respecto al array (figura 5). Se programó un barrido entre -45° y $+45^\circ$ con un intervalo angular de 0.5° entre líneas. El foco de emisión se situó a 38 mm y el rango de la inspección se programó en 50 mm. Se utilizaron 48 elementos en emisión y 96 elementos en recepción.

En este caso se aplicó un ajuste genérico de la interfaz detectada por medidas del tiempo de vuelo en pulso-eco (barrido lineal de 1 elemento) a un polinomio de tercer grado.

Se aplicó la función AUTOFOCUS para determinar la geometría array-pieza, evaluar los arrays virtuales de las 181 líneas que componen la imagen y calcular y programar los parámetros iniciales de enfoque en cada canal activo en recepción.

El tiempo de cálculo de todos los parámetros de esta inspección con auto-enfoque fue de 0.2 segundos desde el momento en que se inicia la estimación de la interfaz hasta el que se genera la primera imagen. Se pueden obtener imágenes continuamente auto-enfocadas a una cadencia de 5 imágenes/s, prácticamente en tiempo real. Es decir, la tecnología SITAU-AUTOFOCUS permite mantener constantemente la máxima calidad de imagen ante variaciones geométricas.

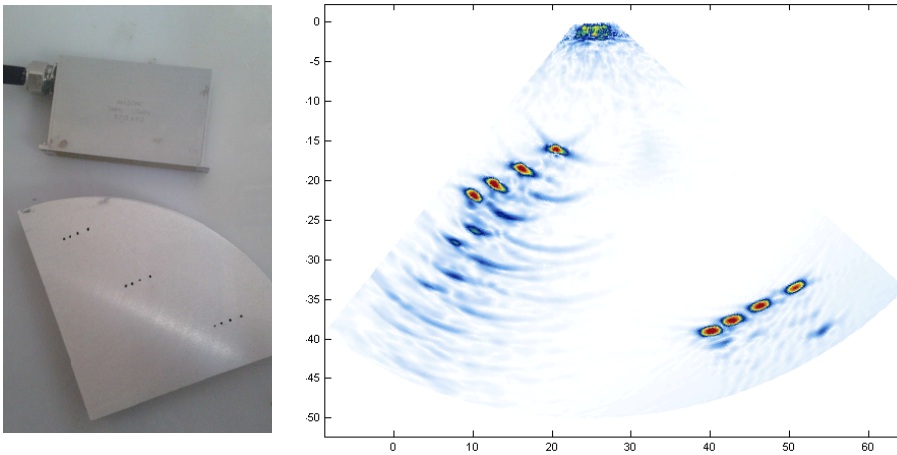


Figura 5. Inspección de una pieza de geometría “desconocida”.

La figura 5.derecha muestra la imagen obtenida, en la que se aprecian dos de las tres filas de taladros laterales practicados en la pieza. Se observa que se mantiene la elevada resolución lateral propia del enfoque dinámico estricto a todas las profundidades de la imagen.

En un tercer experimento, se colocó una pieza plana de aluminio con parejas de taladros laterales, con una orientación arbitraria respecto a la del array (figura 6). Se solicitó una imagen de barrido lineal a 0° (incidencia normal), utilizando aperturas activas de 64 elementos en emisión y recepción hasta cubrir todo el array (128 elementos), esto es, 65 líneas de imagen. El foco de emisión se situó a 35 mm de profundidad, próximo al rango máximo solicitado de 40 mm. La figura 6.derecha muestra la imagen obtenida, donde se observan las indicaciones de los taladros con la resolución esperada de un enfoque dinámico correcto.

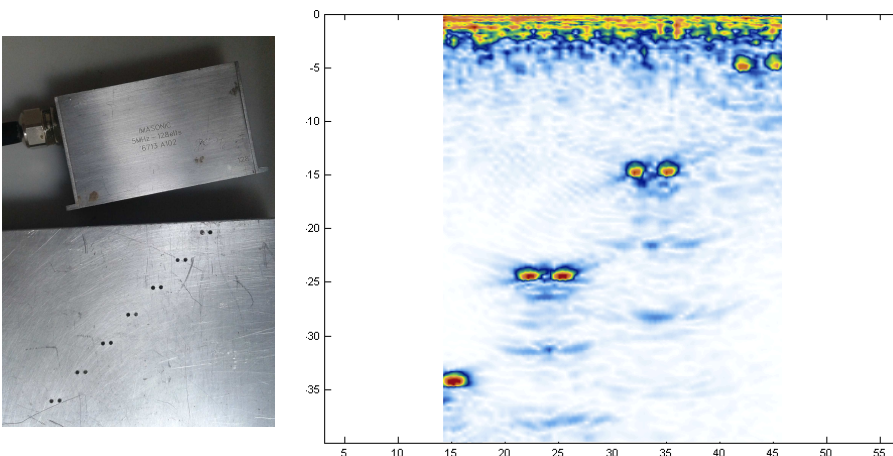


Figura 6. a) Inspección de una pieza plana con el array inclinado un ángulo desconocido.

6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Hasta ahora no se había dotado de una capacidad de autoenfoque a los sistemas de imagen phased array, que contrasta con lo sucedido con las cámaras fotográficas/video. Esta carencia ha dificultado en no pocas ocasiones su aplicación en condiciones reales, especialmente cuando la geometría de los componentes a inspeccionar es compleja, desconocida o variable. Pero, incluso cuando se conoce con precisión, es necesario un proceso de cálculo de leyes focales adaptadas que, inevitablemente, quedan invalidadas ante cualquier desviación de la geometría nominal.

Dado el interés del tema, también se han dado otras aproximaciones notables al problema de autoenfoque con phased arrays. Así, el método SAUL [5] produce una onda de incidencia normal en la superficie tras 3 ó 4 disparos, aunque no realiza ningún tipo de enfoque en el interior de la pieza. Otra alternativa, para TFM, estima la interfaz y evalúa los tiempos de vuelo a los focos mediante una búsqueda iterativa de Fermat, utilizando potentes plataformas CPU/GPUs para limitar el tiempo de cálculo [6].

Por otra parte, nuestro grupo del CSIC desarrolló, conjuntamente con Tecnatom, S.A., una tecnología de corrección de leyes focales en tiempo real para piezas de geometría compleja [7]. La técnica, denominada *Adaptive Beamforming*, evalúa los cambios en la geometría array-pieza durante el barrido a partir de las desviaciones producidas en la imagen anterior, modificando las leyes focales para obtener incidencia normal y mantener el enfoque en la siguiente imagen. No requiere disparos adicionales, aunque sí el conocimiento a priori de la geometría nominal del componente.

Finalmente, la tecnología SITAU-AUTOFOCUS descrita en este trabajo es de propósito general, manteniendo las ventajas del enfoque dinámico y la versatilidad de la técnica phased array. La mayor parte de los cálculos se realizan con fórmulas cerradas que evitan procesos iterativos.

Es suficientemente rápido para muchas aplicaciones (0.2 segundos), aunque tal vez no lo suficiente para compensar imagen a imagen las posibles desviaciones geométricas en barridos a alta velocidad, tema en el que seguimos trabajando.

En cualquier caso, la tecnología SITAU-AUTOFOCUS es la primera disponible comercialmente y de propósito general, que evita los procesos de cálculo y la programación de leyes focales mediante la integración de las funciones necesarias en el hardware-software del sistema. Realiza un enfoque dinámico estricto (todas las muestras) y ha demostrado su robustez en múltiples aplicaciones como las mostradas en este trabajo.

Por otra parte, hace innecesarias las descripciones CAD de la geometría array-pieza, así como el uso de software auxiliar de cálculo de leyes focales. Ello proporciona importantes reducciones de costes y tiempos de preparación de las inspecciones.

7. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto EuroStar E!6771 SAPHARI, financiado por la UE y el CDTI.

REFERENCIAS

- [1] S. Chatillon, S. Mahaut, and P. Dubois, "Simulation of advanced UT phased array techniques with matrix probes and dynamic settings for complex component inspections," *Rev. Quant. Nondestruct. Eval.*, vol. 28, pp. 864–871, 2009.
- [2] J. Camacho, J. F. Cruza, J. Brizuela and C. Fritsch, "Automatic Dynamic Depth Focusing for NDT", *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 61, 4, pp. 673-684, 2014.
- [3] J. F. Cruza, J. Camacho, L. Serrano and C. Fritsch, "New Method for Real-Time Dynamic Focusing Through Interfaces", *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 60, 4, pp. 739-751, 2013.
- [4] C. Fritsch, M. Parrilla, A. Ibáñez, R. Giacchetta and O. Martínez, "The progressive focusing correction technique for ultrasound beamforming", *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 53, 10, pp. 1820–1831, 2006.
- [5] S. Robert, O. Casula, O. Roy and G. Neau, "Real-time Inspection of Complex Composite Structures with a Self-Adaptive Ultrasonic Technique", *18th World Conf. on Non Destructive Testing*, Durban (South Africa), 2012.
- [6] M. Sutcliffe, M. Weston, P. Charlton, K. Donne, B. Wright, and I. Cooper, "Full matrix capture with time-efficient auto-focusing of unknown geometry through *dual*-layered media," *Insight*, vol. 55, no. 6, pp. 297–301, Jun. 2013
- [7] E. Cuevas, S. Hernández, J. Camacho, J. F. Cruza, "Fast Scanning and Adaptive Beamforming: two innovative algorithms to improve ultrasonic inspections", 11th. European Conf. on NDT (ECNDT 2014), Oct. 6-10, Prague, Czech Republic, 2014.