

## PROTOTIPO DE UN ARRAY BIDIMENSIONAL ULTRA-DISPERSO PARA IMAGEN ULTRASÓNICA DE ALTA RESOLUCIÓN

Óscar Martínez-Graullera<sup>1</sup>, Julio Cesar Eduardo de Souza<sup>2</sup>, Ricardo Tokio Higuti<sup>2</sup>, Monserrat Parrilla Romero<sup>1</sup>, Alberto Ibañez Rodriguez<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Tecnologías Físicas y de la Información ITEFI (CSIC), C/Serrano 144 Madrid  
e-mail: oscar.martinez@csic.es

<sup>2</sup> Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira,  
Avenida Brasil, 56. 15385000 - Ilha Solteira, SP - Brasil

### Resumen

El presente trabajo describe un proceso de fabricación para prototipos de arrays ultrasónicos dispersos basado en tecnología de bajo coste. A modo de ejemplo se desarrolla una apertura compuesta por dos aperturas. La primera con 21 elementos opera en emisión y la segunda con 16 opera en recepción. Esta configuración simplifica la electrónica, mejora la relación señal ruido y para un número dado de canales aumenta el nivel de información en las señales. La apertura fabricada tiene un diámetro de 80 longitudes de onda. En una configuración plena debería estar compuesta por más de 20000 elementos. Con un tamaño del elemento de 2 longitudes de onda se cubre el 3 % de la apertura plena. Este hecho proporciona a la misma la consideración de ultrasparse. Para compensar el patrón de difracción del elemento, estos se disponen sobre una superficie esférica con un ángulo de 20 grados. La apertura fue diseñada para evaluar la capacidad de generar imagen de alta resolución con un número muy reducido de elementos.

**Palabras clave:** imagen volumétrica, array dispersos 2D, fabricación de transductores.

### Abstract

This paper describes cost-effective manufacturing process of two-dimensional sparse array prototypes. As an example an aperture consisting of two apertures is presented. This configuration simplifies the electronics, improves the signal to noise ratio and increases the level of signal information for a given number of channels. The manufactured aperture has a diameter of 80 wavelengths, which means that in a complete configuration it should be composed of more than 20000 elements. In our design, the emission aperture is composed by 21 elements and the reception is composed by 16 elements. With an element size of 2 wavelengths, only 3 % of the full aperture is covered, resulting in an ultrasparse array. To compensate for the diffraction pattern of the element, they are arranged on a spherical surface with an angle of 20 degrees. The aperture was determined to assess the ability to generate a high resolution image with a very small number of elements.

**Keywords:** volumetric ultrasonic imaging, 2D sparse arrays, transducer manufacture

**PACS n.º.** 43.60.-c, 43.60.Lq, 43.60.Fg

## 1. Introducción

A día de hoy, los arrays de transductores ultrasónicos bidimensionales están considerados una de las herramientas de análisis más prometedoras. Su capacidad para proporcionar información de un volumen, desde distintos puntos de observación, permite tanto medir propiedades mecánicas sobre los puntos de la región de interés, como componer una imagen volumétrica de la misma. No obstante, para obtener una imagen de alta calidad estas aperturas precisan que la distancia entre elementos este limitada a media longitud de onda ( $\lambda/2$ ), lo que en el caso de aperturas de alta resolución implica que debe estar compuesta por decenas de miles de elementos. Dejando a parte el consumo energético, que ya de por sí es un reto, este hecho genera una serie de desafíos importantes: (i) a nivel de fabricación, tanto el sensor como la electrónica asociada al front-end (incluye tanto cables como componentes pasivos y activos) suponen un reto de ensamblaje y empaquetamiento; (ii) a nivel electrónico, el pequeño tamaño de los elementos lleva asociada una alta impedancia que produce señales con baja SNR (baja capacidad de radiación, baja sensibilidad) que limita la capacidad de operación del sistema; (iii) a nivel de control del sistema, por la complejidad de adquirir, procesar y manejar grandes volúmenes de datos en tiempo real; (iv) y por supuesto a nivel económico, ya que todo esto lleva a un alto coste tanto por el sensor como por el sistema.

Una parte de estos desafíos están siendo superados gracias a la microelectrónica (p.e. capacitive micro-machined ultrasonic transducer, CMUT) y los procedimientos de micromecanizado, que han permitido desarrollar de aperturas muy densamente pobladas [1]. Sin embargo, otros están todavía sin resolver o las soluciones propuestas hasta la fecha involucran un alto coste y cierto grado de incertidumbre que hace difícil justificar su desarrollo con la tecnología actual. Consecuentemente, la oferta de comercial tanto de transductores 2D como de los sistemas asociados es aún muy reducida y en cualquier caso muy convencional.

En este escenario, el desarrollo de soluciones para imagen volumétrica basada en arrays dispersos sigue siendo una opción interesante [2]. En esta línea de investigación, para un número de elementos y unas dimensiones de apertura dadas, el reto es identificar una distribución de elementos capaz de garantizar un nivel de calidad en la imagen acorde con las especificaciones deseadas. En la literatura, podemos encontrar muchos ejemplos teóricos de este tipo de aperturas [2, 4, 5]. No obstante, el número de prototipos experimentales presentados es muy reducido, debido fundamentalmente a la complejidad y el alto coste de los procesos de fabricación de este tipo de dispositivos. Sobre este último problema se centra este trabajo.

Para ello, a través del desarrollo de una apertura de  $80\lambda$  con baja densidad de elementos, se analiza el uso de la tecnología de fabricación aditiva para desarrollar prototipos de bajo coste. Los resultados muestran que la fabricación aditiva da una interesante oportunidad a los diseñadores de array para desarrollar arriesgadas pruebas de concepto con un coste relativamente bajo antes de avanzar a prototipos más industrializados.

## 2. Diseño de la apertura

Los requerimientos surgen de la necesidad de desarrollar un sistema de imagen 3D con un número de recursos limitados. Por ello se plantea generar la imagen a partir de la metodología de apertura sintética [6]. Esta técnica, basada en la adquisición desasociada de las señales involucradas en el proceso, es capaz de proporcionar una imagen con la máxima resolución lateral posible. No obstante, dado el pequeño tamaño de los elementos convencionales ( $,5\lambda \times ,5\lambda$ ) su baja capacidad de radiación y su baja sensibilidad limitan la relación señal a ruido así como su capacidad de penetración. Incrementar el área de emisión/recepción con un número de elementos reducido es otro de los requerimientos del diseño.

Una solución pasa por incrementar el tamaño del elemento a  $2\lambda \times 2\lambda$ . No obstante esto implica una reducción de la capacidad de radiación del elemento que conlleva una pérdida de la capacidad de enfo-

car en la apertura. En la figura 1 se describen las consecuencias de este hecho para una simulación de una apertura dispersa en espiral de  $60\lambda$  y 96 elementos. Tomando como señal de excitación un pulso gaussiano con un ancho de banda del 66 %, la caída del campo en el foco respecto al eje es de 20dB a  $20^\circ$ .

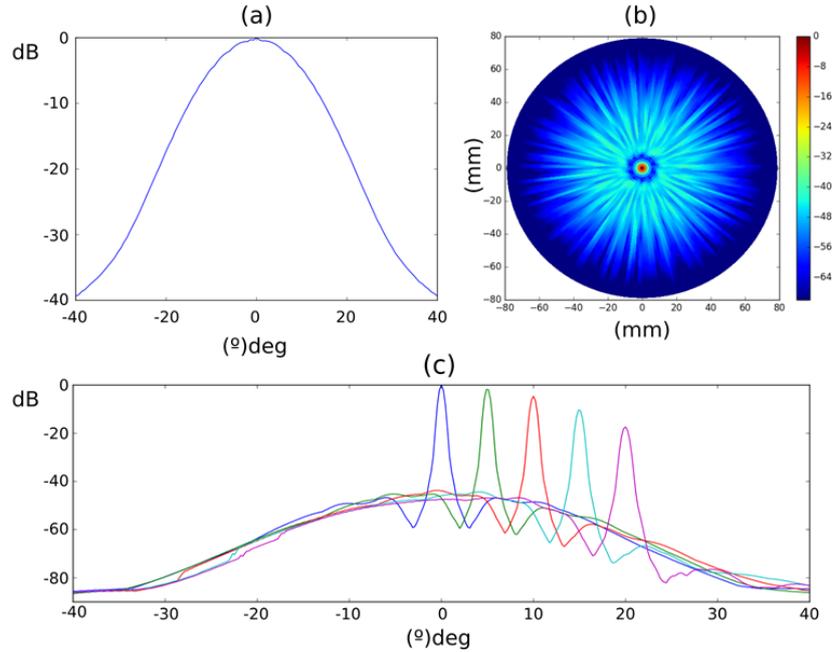


Figura 1: (a) Perfil lateral del máximo de campo en el foco. (b) Point Spread Function en el plano focal ( $\theta=0:20^\circ$   $\phi=0:360^\circ$ ). (c) Perfiles laterales en pulso eco para 5 diferentes posiciones del foco:  $0^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $10^\circ$  y  $15^\circ$ .

Como es bien sabido, la respuesta del array en el foco se ve modulada por la respuesta del elemento. De manera que, cuando en la figura 1(a) se muestra el nivel de presión en el foco para un barrido de  $-40^\circ$  a  $+40^\circ$  en elevación, este resultado se considera equivalente a la respuesta del elemento. La figura muestra que la caída de 3dB se produce sobre los  $8^\circ$ . Este punto constituye la referencia para considerar la existencia de solape entre los diagramas de radiación de los elementos. En este sentido, consideramos que la apertura es plenamente funcional cuando el solape entre extremos se cruza a los  $8^\circ$ . Antes de este punto la apertura presenta una zona muerta donde la participación de los elementos es desigual. Para la apertura que estamos considerando la zona de trabajo empieza en 245mm. Con objeto de acercar la zona de trabajo, planteamos montar los elementos sobre una lente esférica, definida partir de su ángulo de convergencia. En la figura 2 se presenta como para una apertura con un grado de convergencia de  $20^\circ$ , el solape entre las respuestas de los elementos facilita la creación de una región de trabajo (*Region of Work, ROW*) que se extiende en profundidad como un cono truncado desde 77,8mm hasta 181,3mm, con un diámetro menor de 48mm en la y un diámetro mayor de 93mm. Para la resolución lateral de la apertura, el muestreo de ese volumen en cada profundidad supone generar unas 1600 muestras.

Otros requerimientos son que la frecuencia de trabajo debe de estar en 1.5MHz con un ancho de banda sobre el 50 % y que el número de elementos en la apertura debe de rondar ser inferior a 32. Para estos requerimientos el rango dinámico que podemos obtener ronda entre entre 25dB (16 elementos) y 30 dB (32 elementos).

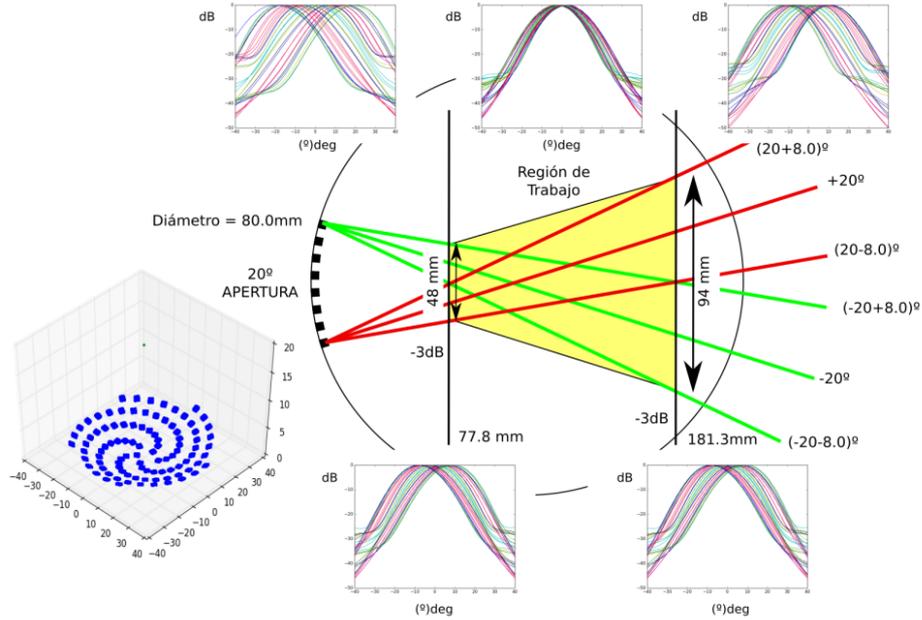


Figura 2: Estructura de la región de trabajo de una apertura focalizada definida a partir del solape de los diagramas de radiación de sus elementos extremos.

### 2.1. La apertura bajo estudio

La pretensión detrás de estos requerimientos es evaluar experimentalmente una serie de aspectos para el desarrollo de sistemas ultrasónicos de imagen 3D con pocos recursos. Por un lado, interesa saber la capacidad de una apertura altamente dispersa de generar imagen volumétrica de alta resolución. Por otro lado, interesa conocer si una lente de focalización fija puede dar una zona de trabajo apreciable donde se compense el coste de incrementar del área del elemento. Y por último, evaluar el rendimiento de una serie de distribuciones diseñadas según una estrategia adaptada al desarrollo de un nuevo conformador basado en el coarray [3].

La fabricación de estas aperturas como simple prueba de concepto supone una serie de riesgos asociados a lo poco convencional de las mismas que se ven poco justificados frente a su coste. Es por ello, que se hace deseable desarrollar una serie de prototipos de pruebas que, como paso previo a la fabricación más profesional, proporcionen los resultados experimentales necesarios para seleccionar la apertura candidata más adecuada. A modo de ejemplo, se han seleccionado dos aperturas de  $80\lambda$  de diámetro. La primera con 16 elementos (AP16) ha servido como prototipo para ensayar el comportamiento de algunos materiales así como la facilidad de operar con determinadas soluciones estructurales. La segunda, compuesta por dos aperturas distintas para emisión y recepción integradas en una sola, es el modelo prototipo de referencia para ensayar las técnicas de conformación más avanzadas (AP21). Esta apertura contará con 21 elementos en emisión y 16 en recepción. Ambas aperturas siguen un diseño basado en la espiral de Fermat [4] tal y como se presenta en la figura 3. Donde además presentamos el campo acústico de ambas aperturas (figuras 4 y 5).

## 3. Prototipado rápido de arrays dispersos

Este grupo ha desarrollado una línea de trabajo muy activa en el desarrollo de procedimientos de prototipado de bajo coste para arrays de transductores basado en técnicas de impresión 3D (fabricación aditiva). En particular, en el uso de la Fused Deposition Modeling (FDM) para la fabricación de componentes

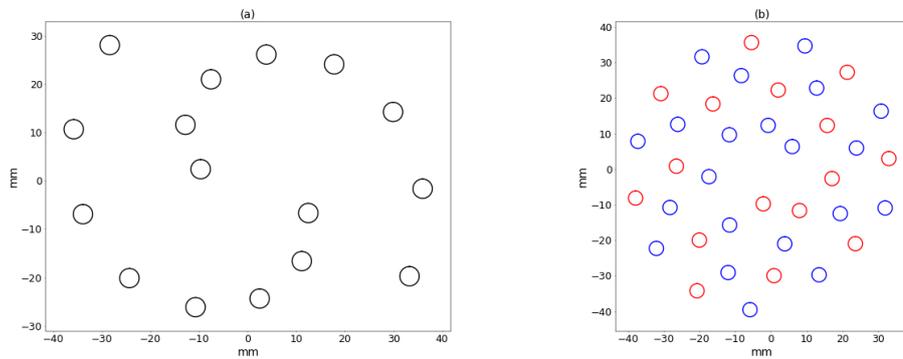


Figura 3: (a) Apertura AP16: 16 elementos actuando en emisión y recepción (b) Apertura AP21: apertura de emisión de 21 elementos (azul); apertura de recepción de 16 elementos (rojo)

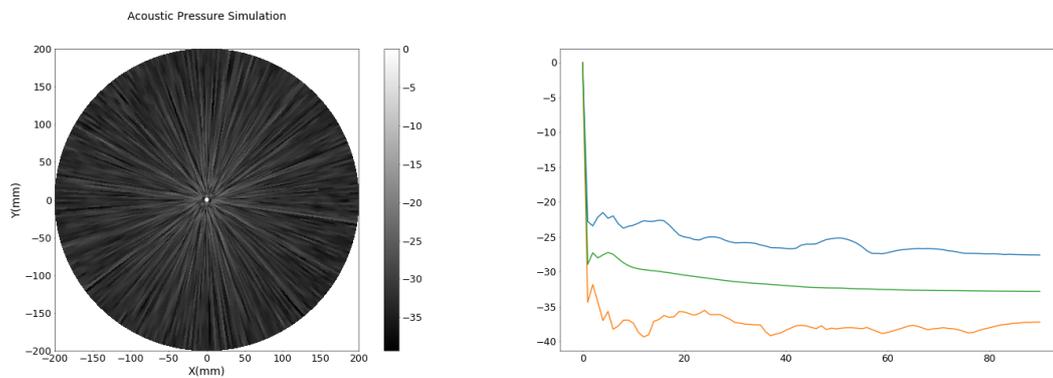


Figura 4: Campo acústico de la apertura AP16. En la izquierda proyección sobre la semiesfera. En la derecha: máximo para cada ángulo de elevación (azul); media para cada ángulo de elevación (verde); mínimo para cada ángulo de elevación (naranja)

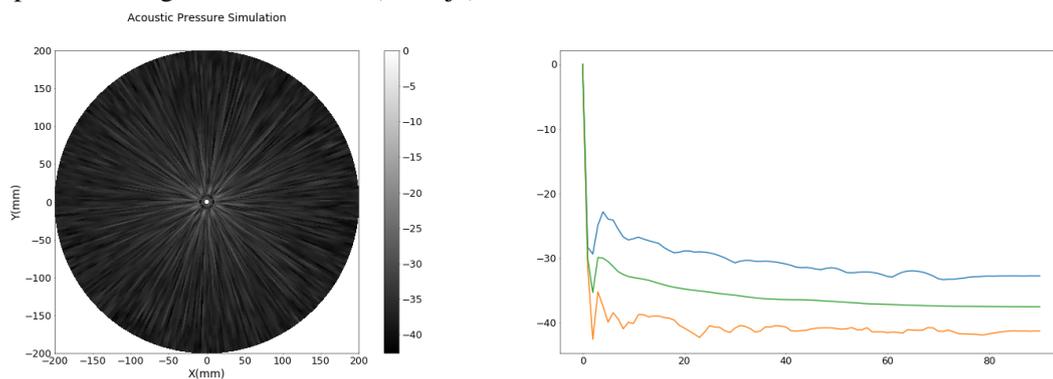


Figura 5: Campo acústico de la apertura AP21. En la izquierda proyección sobre la semiesfera. En la derecha: máximo para cada ángulo de elevación (azul); media para cada ángulo de elevación (verde); mínimo para cada ángulo de elevación (naranja)

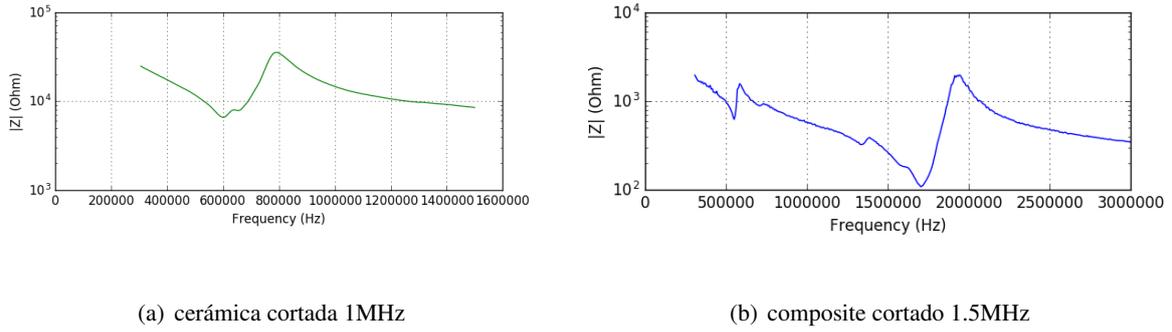


Figura 6: Impedancia acústica media sobre una cerámica (tamaño aproximado de  $1,5\lambda \times 1,5\lambda$ ) y un composite (tamaño aproximado de  $2\lambda \times 2\lambda$ ).

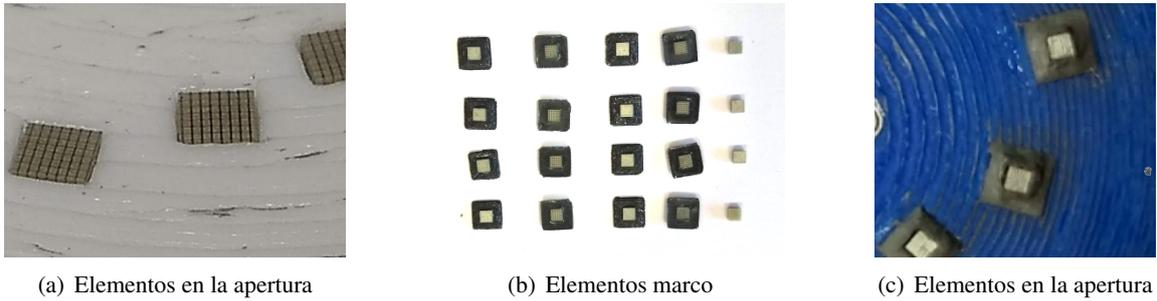


Figura 7: Montaje de los elementos.

estructurales [7]. Los materiales usados con esta técnica son plásticos que además pueden presentar interesantes propiedades mecánicas para soportar un sistema de array. En nuestro caso hemos trabajado con acrylonitrile butadiene styrene (ABS), polylactic acid (PLA) y thermoplastic polyurethane (TPU). Actualmente las impresoras 3D tienen un alto grado de precisión y un bajo coste. Además, el desarrollo de muchos modelos se basa en los principios movimiento Open Source y es fácil acceder a su diseño e introducir modificaciones que mejoren sus prestaciones. Estas impresoras cuentan con el apoyo de potentes paquetes de CAD (en este trabajo se ha usado Freecad) que permiten automatizar las tareas del diseño. Un aspecto importante si trabajas con muchos elementos. Básicamente identificamos tres partes en el proceso de fabricación de los prototipos: el elemento piezoeléctrico, la estructura de la distribución y el backing.

### 3.1. El elemento piezoeléctrico

En los primeros diseños trabajamos con placas de cerámicas PZ27 para 1MHz, que se cortaban con la forma del elemento [8]. Estos primeros diseños permitían trabajar con tamaños de  $\lambda \times \lambda$  ( $1,5\text{mm}^2$ ) pero el proceso del corte no era muy preciso y el desgaste de la herramienta producía que los elementos perdieran su forma cúbica rápidamente conforme progresaba el corte. El resultado final era pobre en lo que respecta a la señal dado la alta impedancia. Posteriormente se cambió a laminas de piezocomposite de 1.5MHz [9]. Este material presenta una impedancia más baja que la cerámica y es mucho más blando, hasta tal punto que incluso el corte puede llegar a hacerse con una simple guillotina.

En la figura 6 se muestra la impedancia eléctrica de un elemento cerámico y un composite. A parte de la diferencia de impedancias entre ambas, destaca el hecho de que una vez cortadas la cerámica desplaza hacia frecuencias bajas su frecuencia de resonancia mientras que el composite la mantiene acorde a sus especificaciones.

El proceso de preparación del elemento ha ido evolucionando asociado al diseño de la cavidad (ver

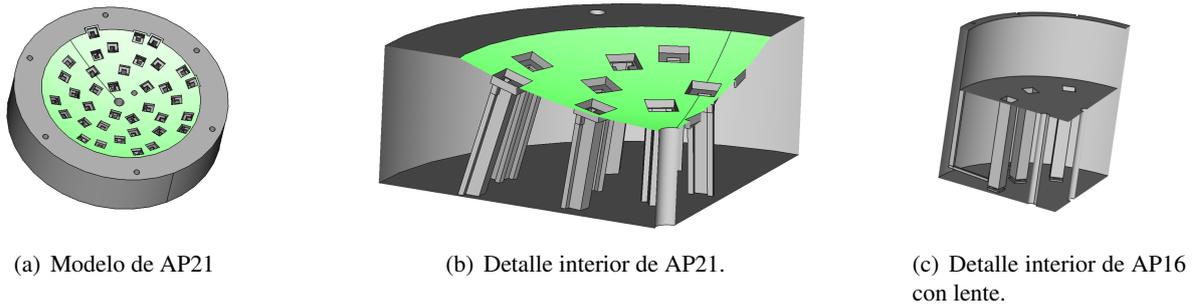


Figura 8: Figuras 3D de las piezas de la estructuras de los modelos

figura 7). El diseño de la cavidad es un punto delicado porque debe contar con puntos de apoyo para el elemento y para el cable, y contar con que se van a usar epoxis conductores para unir ambos. En principio montábamos el elemento tal cual sobre la apertura, pero se generaban ciertas holguras cuando habían imprecisiones en el corte y era fácil que durante la manipulación se produjera contaminación conductiva entre ambas caras. Finalmente desarrollamos un marco alrededor del elemento, facilitando su manipulación y el posicionamiento a costa de agrandar el espacio que necesita el elemento y limitar en consecuencia la distancia entre elementos. Este procedimiento mejoró significativamente el proceso de colocación de los elementos y disminuyó los errores.

### 3.2. La estructura de la distribución

Propiamente dicho la estructura de distribución es toda la estructura de soporte. Esto incluye el hueco del elemento, el soporte y los canales del cable de señal, del backing y de la masa. Este elemento se diseña con programas de CAD y, dada la repetitividad de elementos, es conveniente automatizar algunas de las partes. En nuestro caso usamos scripts de python en FreeCad para montar la apertura. En la figura 8 presentamos detalles de los modelos de CAD usados en este trabajo. En este caso, hemos optado por implementar distintos procedimientos de salida para los cables de señal. La apertura AP21 los cables van paralelos al backing y salen por arriba. En la AP16 los cables salen perpendiculares al canal del backing y desde el borde siguen a la parte trasera de la apertura. Un aspecto importante es que ambos diseños permiten canales individuales de backing.

Para el caso de la apertura AP16, dividimos la estructura en dos partes para facilitar la manipulación y los procesos de limpieza y de preparación (ver figura 9). La primera, es un disco delgado y contiene el elemento y el canal del cable de señal. La segunda, es por donde progresan los canales de backing. Esta etapa es varias veces más alto que la primera y puede ejecutarse de una sola pieza (un array de 64 elementos [8]) o en varias piezas si se pretende obtener un mayor control sobre la deposición del backing (array de 96 elementos [9]).

Sin embargo, este tipo de montaje se complica cuando no es posible sacar los cables de forma radial por el solapamiento entre el camino de los cables y los elementos. Por ese motivo en el caso de la AP21 se ha decidido sacar el cable en paralelo a la estructura de backing. En este caso desarrollar un montaje por etapas es más complejo y laborioso por lo que el diseño se ejecuto sobre una sola pieza.

Respecto a los materiales, al ser plásticos tienden a minimizar el crosstalk mecánico entre elementos lo que resulta muy interesante. No obstante, el ABS fue descartado por ser vulnerable a la acetona que es muy usada a lo largo de todo el proceso para limpiar los restos de epoxi. Por ello hemos optado trabajar con PLA y TPU. La AP21 fue desarrollada totalmente con PLA. Para el diseño de la AP16 se desarrollaron dos versiones. Una apertura esférica en PLA y otra con lente plana para probar el uso del TPU como soporte de marco a los elementos.

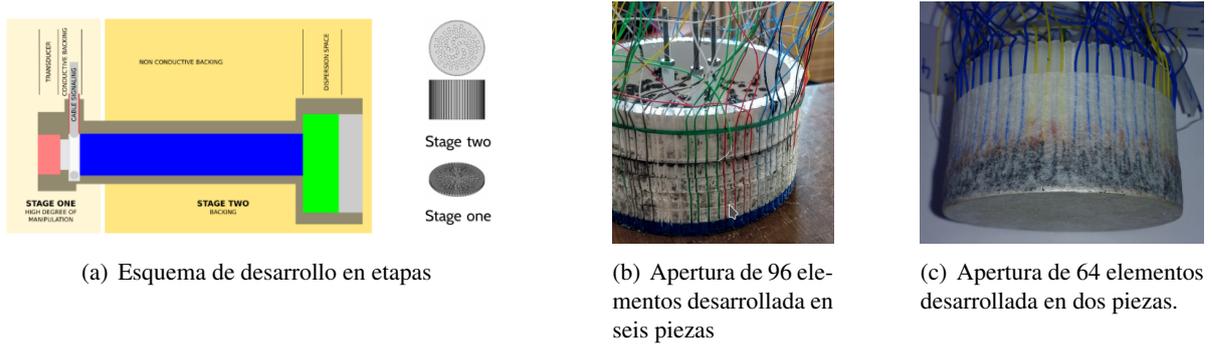


Figura 9: Desarrollo por etapas. Experiencias previas.

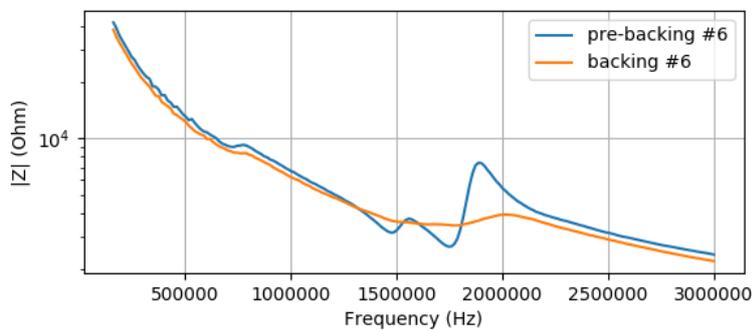


Figura 10: Impedancia eléctrica medida sobre el elemento número 6 de AP16. En azul el valor medido sin backing, en naranja el valor medido con backing.

### 3.3. El backing

El backing esta basado en el epoxi Araldit2020, que es dopado con tungsteno de forma conveniente para conseguir la impedancia deseada. En un principio se ha usado una misma mezcla para todos los elementos pero el hecho de que podamos separar los canales permiten que la carga del backing siga modelos de distribución espacial que podrían mejorar el comportamiento de la apertura. El ejemplo más claro es en AP21, donde podemos usar una mezcla específica para emisión y otra para recepción. Esto no obstante queda fuera del ámbito del presente trabajo y queda aquí a modo de comentario. En la figura 10, mostramos el cambio de impedancia en un elemento de AP16 antes y después de introducir el backing. Se observa que el pico de resonancia se ha suavizado y las resonancias laterales se han reducido.

### 3.4. Sistema de imagen para apertura sintética

La siguiente fase viene determinada por la necesidad de dotar de un control a la apertura, así como de proteger la integridad de las señales. El objetivo es desarrollar un sistema compacto con un mínimo de conexiones que pueda ser controlado por instrumentación convencional. Nuestra propuesta es instrumentar la apertura integrando la etapa de multiplexado y el amplificador de recepción. Un modelo de este sistema, actualmente en fase de desarrollo, se muestra en la figura 11. Este diseño se esta desarrollado para dar soporte a la apertura AP21, separando la emisión de la recepción y simplificando por tanto la electrónica asociada al front-end.

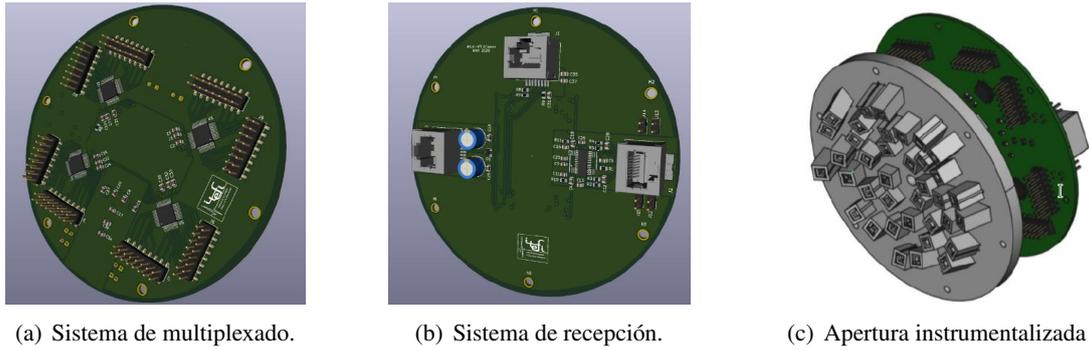


Figura 11: Modelo del prototipo de apertura instrumentalizada para un sistema de imagen basado en apertura sintética.

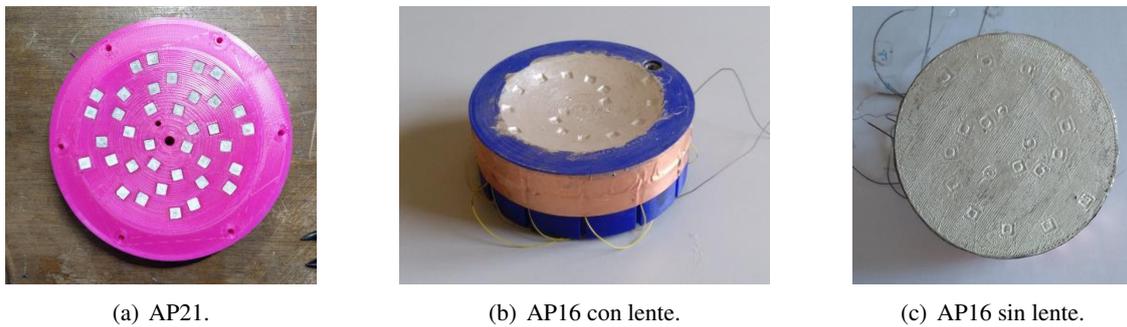


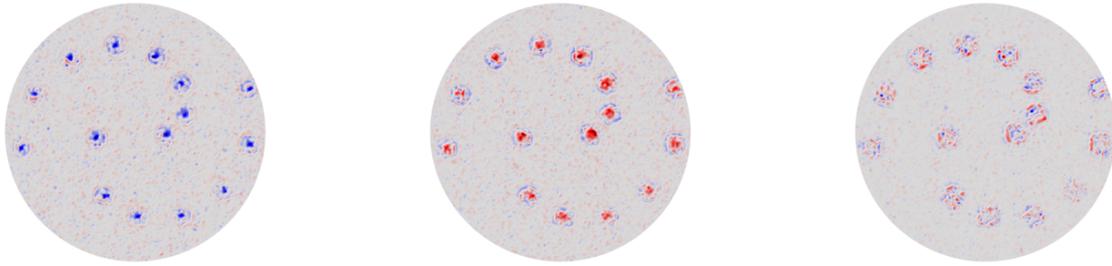
Figura 12: Prototipos desarrollados antes de ser ensamblados en su capsula con distinto grado de desarrollo

## 4. Resultados

A lo largo de este trabajo de cada modelo se han desarrollado varias aperturas, introduciendo progresivamente mejoras en el diseño y en el proceso de montaje que han ayudado a reducir los errores de fabricación. Estos errores han sido principalmente debidos a un contacto pobre entre el elemento y el cable de señal o a cortos producido en zonas donde el epoxi conductor se ha filtrado más allá de su posición. En algunos casos estos cortos se han generado a partir de arcos al excitar con alta tensión el disparo de los elementos. En consecuencia, las progresivas experiencias han facilitado rediseñar la forma de generar el marco del elemento y el procedimiento de inserción del mismo en la apertura.

La figura 12 muestra en distintos grados de desarrollo las tres aperturas. La AP21 esta en una fase de diseño previo al posicionamiento de la masa con los elementos ya insertados. La AP16 con lente se presenta en una fase más avanzada de fabricación, donde se han ensamblado las dos piezas y los cables de señal se han protegido eléctrica y mecánicamente con una cinta de cobre. La AP16 plana muestra como quedan los elementos insertados en la lámina de TPU. Este diseño permite reducir el marco y acercar más los elementos entre sí. En general el tiempo de producción de una apertura es inferior a una semana y es principalmente dependiente del número de elementos a integrar. Debido a la naturaleza del material, los procesos de curado son a temperatura ambiente. Actualmente, estamos desarrollando pruebas de rendimiento sobre los tres modelos. Evaluando la respuesta en pulso eco, la impedancia acústica y su respuesta mecánica en el vibrómetro.

La figura 13 muestra algunas capturas del vibrómetro para la apertura AP16 con lente plana mostrando los puntos de valle y cresta del primer ciclo, así como en un punto final de la oscilación. La oscilación final presenta una serie de modos laterales que aunque no se propagan a gran distancia a lo largo del

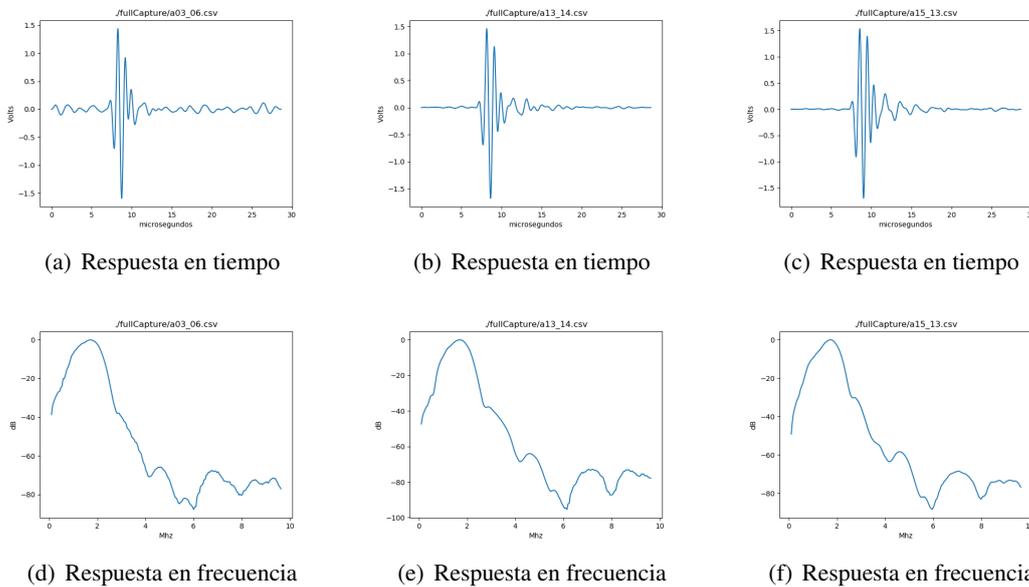


(a) 10 % del tiempo de respuesta. En ciclo negativo.

(b) 23 % del tiempo de respuesta. En ciclo positivo.

(c) 77 % del tiempo de respuesta.

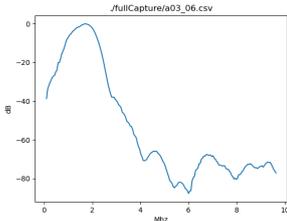
Figura 13: Medición en el vibrómetro de la respuesta a un pulso de la apertura AP16



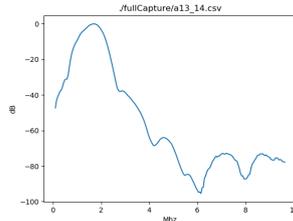
(a) Respuesta en tiempo

(b) Respuesta en tiempo

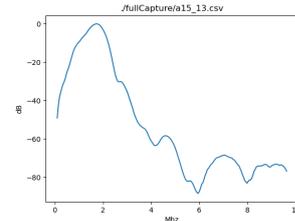
(c) Respuesta en tiempo



(d) Respuesta en frecuencia



(e) Respuesta en frecuencia



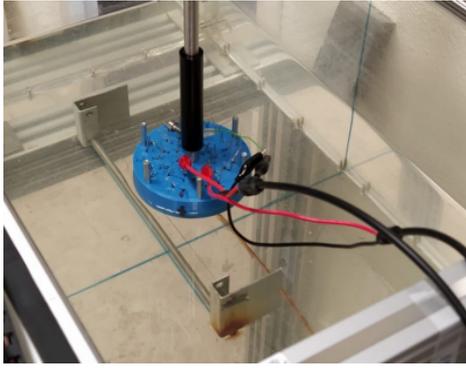
(f) Respuesta en frecuencia

Figura 14: Pulso ultrasónico en pulso-eco medida sobre tres elementos en AP21 con lente contra un reflecto plano.

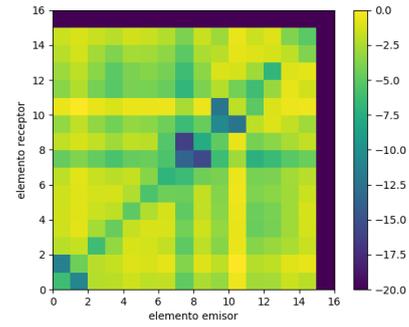
material si reducen su eficiencia. Estos modos se generan porque la lámina de TPU no mantiene sujeto el elemento en esa dimensión.

Respecto a la apertura AP21, en el momento de esta redacción se encuentra en su última fase de montaje y los resultados que podemos ofrecer son parciales. La figura 14 muestra la respuesta en pulso-eco de las señales e15r13, e13r14 y e03r06. Los datos presentados son previos a la introducción del backing y muestran un ancho de banda del 33 %.

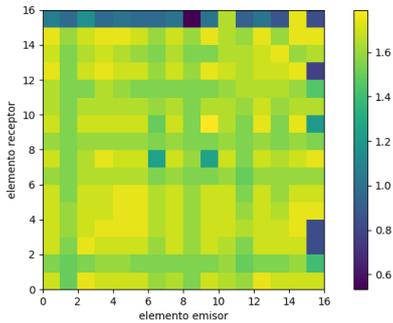
En el caso de AP16 con lente, la apertura perdió uno de los elementos. No obstante se realizaron pruebas para evaluar la respuesta pulso eco mediante la adquisición del Full Matrix Capture (figura 15). Dada la curvatura de la lente, se genero una escena 3D con un hilo situado a 90mm de la apertura a modo de reflector. Se evaluó la reflectividad del eco, la frecuencia central del eco y el ancho de banda calculado en forma porcentual. Los resultados muestran que el elemento 16 esta muerto. Su análisis mostró que ha sido consecuencia de un mal contacto entre el cable y el elemento. Para valorar los resultados de reflectividad, debe de tenerse en cuenta que el resultado depende tanto del rendimiento particular de los elementos como de su diagrama de radiación y la orientación del hilo respecto al emisor y el receptor. Los resultados muestran que las amplitudes obtenidas están mayoritariamente dentro del rango de los 6dBs.



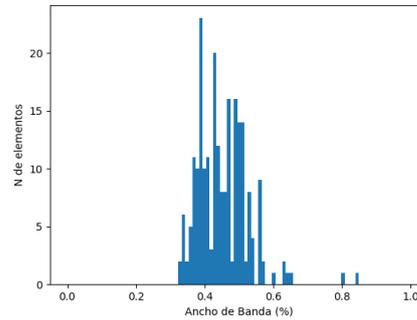
(a) Montaje experimental



(b) Reflectividad del eco en dB



(c) Frecuencia central



(d) Ancho de banda

Figura 15: Resultados experimentales de pulso-eco para la AP16 con lente frente a un hilo

Este hecho queda dentro de las expectativas del modelo de simulación desarrollado para la apertura con lente.

Respecto a la frecuencia central, la media opera en el rango de 1.6Mhz, la más baja esta en 1.3MHz y la mayor esta a 1.85Mhz. La distribución de anchos de banda es más baja de lo esperado, estando su media en el 45 % con un valor mínimo del 33 % y un valor máximo del 85 %. Este hecho se achaca a una incorrecta colocación del backing.

## 5. Conclusiones

El trabajo ha mostrado un procedimiento de bajo coste para la construcción de una serie de aperturas dispersas. El procedimiento de fabricación ha sido perfilado a través de distintos modelos y siempre empleando herramientas opensource. El bajo coste del proceso y el fácil acceso a las herramientas ha permitido seguir un modelo de desarrollo rápido basado en prueba y error que ha generado una línea de aprendizaje muy rápida. Actualmente, el tiempo de fabricación de una apertura es inferior a una semana y el proceso de fabricación esta consolidado en la mayoría de sus etapas.

El proceso ha mostrado ser capaz de generar aperturas complejas con los elementos distribuidos sobre una lente. Los resultados experimentales también muestran que con elementos de tamaño  $2\lambda \times 2\lambda$  al ser montados sobre una lente somos capaces de compensar su diagrama de radiación acercando así la zona de trabajo. El emplear elementos de este tamaño permite mejorar la SNR por 16 respecto al elemento convencional.

Esta situación nos esta llevando a una segunda etapa de desarrollo donde empezamos a afinar los procesos de generación del backing. Nuestra expectativa está en ser capaces de generar cambios controlados en el

modo de funcionamiento de la apertura en función de la distribución de la apertura y de la funcionalidad prevista en sus elementos, ya sea emisión o recepción. Por otro lado, estamos diseñando electrónica específica para integrar dentro de la apertura. En especial se está integrando el multiplexor y la primera etapa de amplificación. Esperamos así, añadiendo instrumentación electrónica común, desarrollar un sistema de bajo coste para imagen 3D.

Por último, la facilidad para producir aperturas no convencionales abre la posibilidad de desarrollar nuevas estrategias de diseño que optimicen la distribución de los elementos conforme a los requerimientos que una técnica de conformación específicas pueda requerir para mejorar su funcionamiento. Este proceso hará que ambos elementos, apertura y conformador, sean partes constitutivas e indivisibles de una misma etapa de procesado.

## Agradecimiento

Este trabajo es resultado del proyecto DPI2016-80239-R, financiado por el Gobierno de España a través de la Agencia Estatal de Investigación y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (AEI/FEDER, UE). O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq)

## Referencias

- [1] Oralkan, Omer, et al. Volumetric ultrasound imaging using 2-D CMUT arrays, *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control* 50.11 2003, 1581-1594.
- [2] Erstad, Jan O. and Sverre Holm, An approach to the design of sparse array systems, *Proceedings of IEEE Ultrasonics Symposium IEEE*, vol. 3,1994, 1507-1510.
- [3] O. Martínez-Graullera et al., Técnica de conformación basada en el coarray para mejorar la calidad de imagen en sistemas de apertura sintética. *ACUSTICA 2020*. Faro.
- [4] O. Martínez-Graullera et al., 2D array design based on Fermat spiral for ultrasound imaging, *Ultrasonics*, vol. 50-2 2010, 280-289.
- [5] Emmanuel Roux et al., Experimental 3-D Ultrasound Imaging with 2-D Sparse Arrays using Focused and Diverging Waves. *Scientific Reports* (2018), 8:9108, DOI:10.1038/s41598-018-27490-2
- [6] C. Holmes, et al., “Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit–receive array data for non-destructive evaluation”, *NDT & E Int.*, 38(8) 2005, 701 – 711.
- [7] Michael Molitch-Hou, Overview of additive manufacturing process, *Additive Manufacturing*, 2018,1-38.
- [8] O. Martínez-Graullera et al. Prototyping sparse arrays of ultrasonic transducers for 3D image generation. *Proc. Mtgs. Acoust.* 38, 030012 (2019); <https://doi.org/10.1121/2.0001114>
- [9] O. Martínez-Graullera et al., The Role of Additive Manufacturing Technology in the Design of Sparse Transducer Arrays,”2019 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), pp. 1761-1764, doi: 10.1109/ULTSYM.2019.8925591.