

DESARROLLO DE UN PROCEDIMIENTO RÁPIDO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE ARRAYS BIDIMENSIONALES DE TRANSDUCTORES ULTRASÓNICOS

Trabajo de Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Acústica en la Industria y el Transporte

Autor:

Adrián Blanco Paetsch

Director:

Dr. Óscar Martínez Graullera

Instituto de Tecnologías Físicas y de la Información (CSIC)

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES

2017



Tribunal nombrado por la Junta de Escuela de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad Politécnica de Madrid, el día ____ de _____ de 20__.

Presidente D. _____

Vocal D. _____

Secretario D. _____

Realizado el acto de defensa y lectura del Trabajo Fin de Máster el ____ de _____ de 20__

Calificación: _____

El Presidente

El secretario

Agradecimientos

Mis primeras palabras de agradecimiento son para Óscar, director de este trabajo, a quien debo agradecer profundamente toda la atención que me ha dedicado. Quiero darle las gracias por su inagotable paciencia para aclarar todas mis dudas, supervisar detenidamente la elaboración de esta memoria y por su entusiasmo y sus valiosos consejos.

También me gustaría reconocer la ayuda prestada por los profesores y compañeros del DAEND, por sus sugerencias y su apreciada colaboración. Mención especial para Javi, que siempre tuvo un momento para ayudarme de la manera más amable. Gracias al Grupo de I+D en Sensores por prestarme tantas veces el analizador de impedancias. No me puedo olvidar de los compañeros del taller mecánico del ITEFI-CSIC, Raquel, Juan Carlos y Sergio, sin ellos la realización de este proyecto hubiera sido imposible.

A mis amigos y mi familia por ser los primeros en animarme, mi hermana Sandra, Andy, mi primo Isaac y, por supuesto, Laura la Valiente Exploradora, con la que desde hace unos años paso mis mejores momentos. Y a mi padre, que no ha llegado a verlo.

Por último, y como no podía ser de otra manera, gracias a mi madre, a quien dedico este trabajo, por sus consejos y apoyo constante. Herzlichen Dank, Du weißt schon für was!

Este trabajo ha sido desarrollado en el Proyecto DPI2016-80239-R (AEI/FEDER, UE) y está financiado por la Agencia Estatal de Investigación (AEI) y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER).

RESUMEN

Hoy en día, los ultrasonidos son empleados extensamente para inspeccionar cuerpos opacos de forma no invasiva, siendo los ensayos no destructivos (END) y la diagnosis médica sus aplicaciones más populares. Desde la segunda mitad del siglo 20, la generación de imagen ultrasónica se ha venido desarrollando a través de sucesivos hitos tecnológicos. Uno de los campos en donde actualmente se concentran más esfuerzos de investigación es la inspección volumétrica, es decir, la generación de imágenes en tres dimensiones (*imagen 3D*) sin necesidad de mover físicamente el dispositivo transductor. Aunque la inspección 3D empezó a desarrollarse hace dos décadas, actualmente los sistemas comerciales existentes son mayoritariamente de tipo bidimensional. En el presente, la tecnología electrónica e informática capacitan la obtención de imágenes 3D cada vez con más calidad y con razonable coste y velocidad. En las aplicaciones de imagen en tres dimensiones es necesario la desviación y la focalización del haz ultrasónico en todas las direcciones del volumen de propagación. Los arrays de transductores de geometría bidimensional han adquirido una gran importancia ya que permiten ese modo de operación sin necesidad de mover el dispositivo y manteniendo buenas características de imagen. Existe una serie de dificultades a la hora de diseñar y construir arrays 2D y es por ello que, partiendo de la configuración matricial, se buscan otros patrones para disponer los elementos transductores. Una de las alternativas más interesantes son las llamadas aperturas dispersas, como son los anillos segmentados o las espirales. Un nuevo diseño implica la caracterización y evaluación de uno o varios prototipos pero fabricar un transductor poco convencional, y para ese propósito, tiene un alto coste económico, sobre todo si no se obtiene ninguna contraprestación en caso de que no ofrezca un buen desempeño. Para contestar a esta dificultad, en este trabajo se propone la descripción de una metodología para la construcción de un prototipo experimental de array 2D para generación de imagen en 3D, con geometría de espiral de Fermat y de bajo coste.

Índice general

RESUMEN	I
Índice de figuras	V
Índice de tablas	XI
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. LA IMAGEN ULTRASÓNICA	1
1.1.1. Principios físicos	2
1.1.2. Modos de imagen	5
1.1.3. Parámetros de calidad de la imagen ultrasónica	6
1.2. TRANSDUCTORES ULTRASÓNICOS	8
1.2.1. Sistemas de arrays de transductores	10
1.3. Problemática de la imagen 3D	13
1.4. OBJETIVOS DEL TRABAJO	18
2. ARRAYS DISPERSOS	21
2.1. DISEÑO DE ARRAYS BIDIMENSIONALES	21
2.1.1. Diseño de arrays dispersos	23
2.1.2. Diseño de arrays basados en espirales de Fermat	26
2.2. TECNOLOGÍAS PARA LA FABRICACIÓN DE ARRAYS	27
2.3. DISEÑO DE REFERENCIA	30
2.3.1. Selección de la apertura	30
3. FABRICACIÓN DEL TRANSDUCTOR: MATERIALES Y METODOLOGÍA	35
3.1. PROTOTIPADO RÁPIDO	35
3.1.1. La impresión 3D	36
3.1.2. Aplicaciones de la impresión 3D para la construcción de transductores	38

3.2. PROCEDIMIENTO DE FABRICACIÓN	40
3.2.1. Obtención de los elementos del array	42
3.2.2. Distribución de los elementos del array y del conexionado eléctrico	44
3.2.3. Fabricación de la capa de backing	48
3.2.3.1. Posicionamiento del backing	48
3.2.3.2. Sintetizado del backing	52
3.2.4. Fabricación de la capa de adaptación	56
4. MEDIDAS EXPERIMENTALES: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	61
4.1. PROTOTIPOS CONSTRUIDOS	61
4.1.1. Medidas realizadas sobre el prototipo EF4	64
4.2. CARACTERIZACIÓN ELECTROMECAÁNICA	65
4.2.1. Medida de la impedancia	65
4.2.1.1. Sin capa de backing	66
4.2.1.2. Con capa de backing	69
4.2.2. Caracterización del pulso emitido	70
4.2.2.1. Frecuencia central	72
4.2.2.2. Ancho de banda	73
4.2.2.3. Longitud de pulso	73
4.2.2.4. Sensibilidad	76
4.3. CARACTERIZACIÓN VIBROACÚSTICA Y MEDIDA DEL ACOPLA- MIENTO ELECTROMECAÁNICO	78
4.3.1. Patrón de vibración	79
4.3.2. Acoplamiento electromecánico	81
4.4. ANÁLISIS CRÍTICO DE LOS RESULTADOS	82
5. CONCLUSIONES y TRABAJOS FUTUROS	87
5.1. CONCLUSIONES	87
5.2. TRABAJOS FUTUROS	88
A. PRESUPUESTO ECONÓMICO	91
B. PROPIEDADES DEL MATERIAL PIEZOELÉCTRICO Pz27	95
Bibliografía	99

Índice de figuras

1.1. Balance de presión acústica en una aplicación de END para una pieza de composite con una configuración de transmisión.	4
1.2. Tipos clásicos de imagen para una configuración pulso-eco.	6
1.3. Corte transversal del diagrama de radiación de un transductor circular. . .	7
1.4. Patrón de difracción de banda estrecha y de banda ancha de una apertura de 20λ de anillos segmentados bidimensional compuesta por 302 elementos. Focalizando a 0° (línea continua) y a 30° (línea discontinua). Para banda estrecha, (a) campo de presiones para todo el barrido en elevación y (b) detalle del campo alrededor del foco. Para banda ancha, (c) campo de presiones para todo el barrido en elevación y (d) detalle del campo alrededor del foco.	9
1.5. Izquierda: estructura clásica de las capas de un array. Derecha: procedimiento típico de fabricación de un array mediante el corte de una estructura multicapa en elementos de un array 1D.	10
1.6. Izquierda: Array lineal capaz de barrer electrónicamente un plano; se identifica el haz producido en forma de abanico. Derecha: Array matricial capaz de barrer un volumen; se identifica el haz producido en forma de pincel.	11
1.7. Conformador de haz en paralelo. Se distinguen dos etapas: la focalización en emisión, que consta de una red de múltiples pulsers; y la focalización en recepción, que se compone de preamplificadores, conversores A/D y subetapa de procesamiento de datos.	12

-
- 1.8. Sistema genérico de apertura sintética. Consta de un sólo pulser que en cada disparo se controla un elemento particular a través de un multiplexor. En recepción es posible establecer un compromiso entre el grado de paralelismo que podemos soportar y el número de disparos que se deben efectuar por cada emisor para completar el conjunto de señales necesario para componer la imagen. Los datos son almacenados en la memoria de un procesador convencional y tratados para compensar tanto la emisión como la recepción. **13**
- 1.9. Métodos de exploración mecánica. a) Exploración lineal: una serie de imágenes 2D paralelas son almacenadas y usadas para la reconstrucción de la imagen 3D. b) Exploración sectorial: un transductor lineal es girado alternativamente, obteniendo las imágenes 3D a intervalos angulares regulares. c) Exploración sectorial: usa una sonda en la que se aloja un transductor lineal que gira alternativamente. d) Exploración rotacional: se rota un transductor lineal de barrido sectorial, explorando de esta manera un volumen cónico. **15**
- 2.1. Patrón de difracción de una apertura matricial de 20λ con una distancia entre elementos de 2λ . El campo ha sido deflectado para hacer patente las direcciones principales en las que se forman los lóbulos de rejilla. **22**
- 2.2. Patrón de difracción de una apertura de anillos segmentados de 20λ con una distancia entre elementos de 2λ . El campo ha sido deflectado para hacer patente las direcciones principales en las que se forman los lóbulos de rejilla. **25**
- 2.3. Distribuciones de Fermat para 256 elementos con distintos ángulos de divergencia y valores de diámetro. En la figura se muestra el patrón de difracción que generan estas aperturas. Todos los casos superan los 50 dB de rango dinámico salvo el *golden angle*. **27**
- 2.4. Proceso de fabricación de un array de anillos segmentados con cerámica piezocomposite. **29**
- 2.5. Distribución de espiral de Fermat para 64 elementos con distintos ángulos de divergencia $\alpha(^{\circ}) = 84, 95$ y 140 y el mismo diámetro. **32**
- 2.6. Patrones de difracción generados por las aperturas con $\alpha(^{\circ}) = 84, 95$ y 140 . Se muestra el campo acústico de la semiesfera sobre el plano focal (izquierda) y el perfil lateral del máximo, medio y mínimo nivel de pico de los lóbulos de rejilla, medidos en el ángulo de elevación (derecha). **33**

3.1.	(a) Impresora cartesiana Prusa i3 Hephestos. Ofrece una resolución máxima de $60 \mu m$ y una velocidad máxima recomendada de 80 mm/s. (b) Prusa i3 Hephestos imprimiendo una pieza.	38
3.2.	Despiece de un prototipo en espiral de Fermat de 64 elementos.	41
3.3.	(a) Fresa de disco CNC. (b) Barra de cerámica tipo PZT-5A cortada. (c) Representación axonométrica de un pilar piezoeléctrico ($(1, 5x1, 5x2) mm^3$). (d) y (e) Imágenes en las que se puede apreciar el tamaño real de los elementos.	43
3.4.	Diferentes diseños de la estructura de elementos y cableado.	46
3.5.	Modelo CAD de la estructura de elementos y cableado; (a) planta, alzado y planta inferior, (b) perspectiva axonométrica.	47
3.6.	(a) Pieza recién impresa; (b) Pieza con acabado, se aprecia que los huecos para elementos y cables están libres de restos de plástico procedentes del proceso de impresión.	48
3.7.	Inserción de elementos: por presión, (a) cara inferior, (b) detalle de la cara superior, las zonas de color negro son restos de adhesivo usado para la sujeción de elementos y el aislamiento entre sus electrodos (imagen ampliada); con holgura, el método más apropiado, (c) cara inferior, (d) detalle de la cara superior; se observa pequeños fragmentos de papel adhesivo para mantener la cerámica lo más limpia posible de pegamento.	49
3.8.	Sistemas de conexionado de los cables y metalizado: (a) y (b) amarrado a saliente metalizado con ranura central (imágenes ampliadas), (c) y (d) amarrado a saliente con metalizado (imágenes ampliadas); el sistema óptimo elegido, embutido con calor a saliente: (e) sin metalizar, (f) metalizado (imagen ampliada).	50
3.9.	Inserción del cableado de masa; (a) a través de los laterales, (b) y (c) por el centro.	51
3.10.	Estructura de elementos y cableado finalizada: (a), (b) y (c) distintas propuestas; (d) solución óptima.	51
3.11.	Modelo CAD de la estructura de backing: (a) planta y alzado, (b) vista axonométrica.	52
3.12.	Estructura de backing: (a) planta, (b) alzado; (c) cables guiados a través de los canales de la estructura; (d) carcasa de latón con adhesivo; (e) y (f) estructura completa del transductor encapsulada.	53

3.13. (a), (b) y (c) Proceso de sintetizado del backing. (d) Campana de vacío. (e) y (f) Cámara de presión construida en el taller de mecanizado del ITEFI-CSIC.	56
3.14. (a) Capa de backing finalizada. (b) Corte transversal de la capa de backing. Las zonas más oscuras son la estructura de plástico, las más claras son el backing; las partículas de color claro pertenecen a la goma añadida a la mezcla.	57
3.15. Proceso de fabricación de la capa de adaptación: (a) vertido de la resina epoxy sobre molde de papel adhesivo, (b) torno utilizado para desbaste, (c) capa de adaptación antes de su desbastado, (d) capa de adaptación finalizada (el prototipo de la imagen es distinto al de la fotografía anterior.)	59
4.1. De izquierda a derecha, prototipos EF1, EF3, EF2 y EF4	62
4.2. EF1: (a) proceso de mezcla del backing defectuoso, se aprecian grumos de componentes mal mezclados; (b) capa de adaptación con burbujas de aire y disco inferior deformado por efectos de la presión.	63
4.3. EF2: corte longitudinal del disco; se puede observar los canales del cableado inundados de material de backing conductivo.	63
4.4. EF3: disco inferior separado de la estructura superior.	64
4.5. EF4: Cables impregnados de material de backing.	65
4.6. Montaje experimental para la medida de impedancias con el equipo analizador.	67
4.7. Módulo y fase de la impedancia de un elemento representativo de EF4.	68
4.8. Módulo y fase de la impedancia de una pieza de composite vibrando en modo thickness.	68
4.9. Resumen de los valores de impedancia de EF4: (a) módulo (promedio: $6,6 \pm 1,9 \text{ k}\Omega$), (b) fase (promedio: $-45 \pm 11^\circ$).	69
4.10. Módulo de la impedancia de 4 elementos representativos de EF4, antes y después de añadir la capa de backing, en color azul y rojo, respectivamente.	71
4.11. Montaje experimental para la caracterización de los pulsos: (a) equipo de ultrasonidos Ultrascop + software Ultraview, (b) prototipo sumergido en tanque de agua con su cara emisora frente a una pieza de aluminio.	72
4.12. Resumen de los valores de frecuencia central de EF4 (promedio: $647 \pm 20,1 \text{ kHz}$).	73
4.13. Resumen de los anchos de banda de EF4 (promedio: $55,9 \pm 6,8 \%$). La gráfica recoge tan solo los elementos operativos.	74

4.14. Típico pulso-eco de EF4: (a) en el dominio del tiempo, (b) en el dominio de la frecuencia.	74
4.15. Efecto de la capa de backing en la respuesta de cuatro elementos de EF4. Se aprecia una considerable reducción en la longitud de los pulsos con amortiguación (en azul) respecto de los que no la tienen (en rojo).	75
4.16. Resumen de los valores de sensibilidad de EF4 sin capa de backing (promedio: 61.6 \pm 7.6 dB).	77
4.17. Resumen de los valores de sensibilidad de EF4 con capa de backing (promedio: 51.3 \pm 6.4 dB).	77
4.18. Polytec PSV-400: (a) Junction Box + Polytec OFV-5000 Controller + Data Manager System (DMS), (b) 3D Scanning Head.	79
4.19. Diagrama del montaje experimental para la caracterización vibroacústica.	80
4.20. Valor eficaz (RMS) en dB del desplazamiento en la superficie emisora de EF4 al excitar cuatro elementos distintos.	80
4.21. Instante de amplitud máxima de desplazamiento de la apertura al excitar únicamente un elemento; (a) EF4: aparece un solo elemento vibrando, (b) EF2: todos los elementos vibrando al unísono. Los puntos rojos y verdes indican vibración en oposición de fase.	81
4.22. Valor eficaz (RMS) en dB del voltaje en EF2 al excitar un solo elemento.	82
4.23. Medida de acoplamiento electromecánico entre elementos. Espectro de la señal recibida por varios elementos (en color negro en la espiral) cuando se excita uno solo (en color rojo).	83
4.24. Defectos en elementos piezoeléctricos: (a) con diferente superficie emisora, el elemento más pequeño representa un caso extremo y no debería utilizarse; en las imágenes se aprecia que han perdido su metalizado original, (b) elementos reutilizados, (c) elementos deteriorados por fragmentación.	84
4.25. Imperfecciones en el metalizado de los elementos: (a) exceso de espesor de la capa de pintura de plata (imagen ampliada), (b) restos de adhesivo (color negro) sobre un elemento (imagen ampliada), (c) electrodo rayado tras ser pulido (imagen ampliada).	85
4.26. Imperfecciones en las columnas de la capa de backing: (a) burbujas de aire, (b) diferencias en densidad y composición: la composición de la mezcla no se muestra uniforme entre columnas, en algunas de ellas se aprecian partículas de goma en los estratos más bajos mientras que en otras la única fase presente es el W.	85
A.1. Planificación temporal y coste de mano de obra.	92

A.2. Coste de material y coste total.	93
B.1. Propiedades electromecánicas del Pz27.	96
B.2. Formatos de cerámicas Pz27 proporcionados por el fabricante.	97

Índice de tablas

1.1. Datos característicos de diversos materiales genéricos: densidad, velocidad longitudinal, velocidad transversal e impedancia acústica.	3
1.2. Evaluación del número de elementos de aperturas de distinto diámetro y tipos de arrays con la resolución lateral que son capaces de alcanzar. . . .	14
2.1. Resultados obtenidos para varias distribuciones de elementos en una apertura de 25λ de diámetro. Los resultados muestran el número de emisores, de receptores y el número total de elementos en la apertura, así como el nivel de pico de los lóbulos de rejilla.	24
2.2. Nivel de lóbulos para distintos ángulos de divergencia de una espiral de Fermat de 64 elementos medido en el ángulo de elevación.	31
3.1. Ventajas de la impresión 3D.	36
4.1. Resumen de las características del prototipo EF4.	66

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1.1. LA IMAGEN ULTRASÓNICA

Por su capacidad de desvelar el interior de cuerpos opacos, durante los últimos treinta años los ultrasonidos han sido utilizados como base para el desarrollo de una serie de técnicas de medida indirecta que se agrupan bajo el nombre de imagen ultrasónica. En este período de tiempo, la imagen ultrasónica ha ido adquiriendo un gran protagonismo tanto en el campo del diagnóstico clínico como en el sector industrial, principalmente en las aplicaciones de evaluación no destructiva para componentes, materiales y estructuras. Los ultrasonidos son ondas mecánicas que penetran con facilidad en diferentes estructuras y tejidos y que permiten, mediante el análisis de los cambios que sufre la onda durante su propagación, obtener información interna de la estructura con un buen margen de sensibilidad y fiabilidad.

Frente a otros procedimientos de adquisición de imágenes que proporcionan imagen de alta calidad como son los rayos X o la resonancia magnética, los ultrasonidos presentan una serie de ventajas:

- Se trata de una técnica segura durante su manipulación ya que no utilizan radiaciones ionizantes. Por ello, no es lesiva ni produce efectos secundarios.
- Es una técnica poco costosa. Los equipos ultrasónicos son más baratos que los utilizados en otras técnicas de inspección. Además, no necesitan estar situados en instalaciones especiales o aisladas, existiendo incluso una amplia variedad de equipos portables de reducido tamaño.

- A diferencia de otros métodos, no es necesario acceder al cuerpo o estructura por ambos lados o rodeándola, basta con disponer de una pequeña ventana para proceder a la inspección.
- La velocidad de inspección clínica es mayor que en la resonancia magnética.
- En inspección industrial, la técnica por ultrasonidos permite mejores composiciones de imagen que los rayos X.

1.1.1. Principios físicos

Las frecuencias de las ondas ultrasónicas se sitúan siempre por encima del umbral audible, es decir, son superiores a 20 kHz. Estas ondas elásticas inducen a las partículas una vibración que se propaga por el componente bajo estudio a una velocidad y con una resistencia a dicha vibración que son características del material del que está formado. Así, las principales magnitudes que rigen la propagación de los ultrasonidos en un material son su velocidad de propagación (c) y su impedancia acústica (Z), relacionadas a través de la densidad del material:

$$Z = \rho \times c \quad (1.1)$$

Aunque la forma característica de la vibración permite identificar diferentes modos de onda y su confinamiento en el material puede dar lugar a otros más específicos (ondas superficiales, ondas de Lamb, etc.), los tipos fundamentales de onda son la onda longitudinal, donde el movimiento de las partículas coincide con la dirección de propagación de la perturbación, y la onda transversal, donde el movimiento de las partículas es perpendicular a la dirección de propagación de la perturbación. Cada modo tiene una velocidad propia (c_L y c_T , respectivamente) que depende del material a través de su módulo de Young, de la relación de Poisson y de la densidad, y pueden relacionarse entre sí de forma aproximada como $c_T \approx 1/2c_L$ (véase tabla 1.1).

Los cambios en la propagación de la onda se producen principalmente en las interfaces entre materiales con diferente impedancia acústica en donde se generan dos frentes de onda, uno que se propaga sobre el nuevo material y otro que se refleja y retorna al emisor en forma de eco. Las ecuaciones que describen los fenómenos de reflexión y transmisión de la presión acústica de una onda que se propaga con una presión inicial P_0 , desde un medio con impedancia Z_1 a otro con impedancia Z_2 , son:

Material	$\rho(Kg/m^3)10^3$	$c_L(m/s)10^3$	$c_T(m/s)10^3$	$Z(Pa \cdot s/m)10^6$
Hierro y Aceros	7-8	5.5-6	3.2	45
Fundición	7.2	3.5-5.6	2.2-3.2	24
Aluminio	2.71	6.32	3.08	17.1
Cauchos	1-2	1.5-2.5	-	2-3
Resinas y Plásticos	1-1.5	2.5-2.8	1.1-1.4	2.8-3.6
Mármol	2.5-2.8	3.8	-	10
Porcelanas	2.4	5.6-6.2	3.5	14
Cristales	3-4	3.7-4.8	-	13-15
Maderas duras	0.6-1	1-4	-	0.5-3
Agua	1	1.5	-	1.5
Aceites	0.9	1.2-1.7	-	1.2-1.7
Aire y Gases	0.0012	0.33	-	0.0004

Tabla 1.1: Datos característicos de diversos materiales genéricos, densidad, velocidad longitudinal, velocidad transversal e impedancia acústica. Fuente: [1].

- Para la presión acústica transmitida:

$$P_T = P_0 \frac{2Z_2}{(Z_1 + Z_2)} \quad (1.2)$$

- Para la energía reflejada:

$$P_R = P_0 \frac{(Z_1 - Z_2)}{(Z_1 + Z_2)} \quad (1.3)$$

De acuerdo a estos coeficientes y en función de la tabla 1.1 podemos analizar cuál será el balance de presión acústica recibida en una inspección con ultrasonidos. En la figura 1.1 se observan los resultados de una hipotética inspección de una pieza de composite con agua y aire como medios de acoplamiento.

La imagen anterior resalta los problemas de enfrentarse con medios cuya diferencia de impedancias es muy grande. En concreto, una inspección en aire respecto de una en agua supone una pérdida de 128 dB en el nivel de presión acústica recibida en el receptor, lo que hace inviable este tipo de inspección.

Además del paso de interfaz, hay otros fenómenos que modelan la propagación de las ondas a través del componente. Este es el caso de la ley de Snell la cual describe la incidencia oblicua de ondas sobre la interfaz que produce la desviación de la dirección de propagación tanto de la onda reflejada como de la propagada, pudiendo involucrar la creación de nuevos modos de onda (por ejemplo, la conversión de longitudinal a

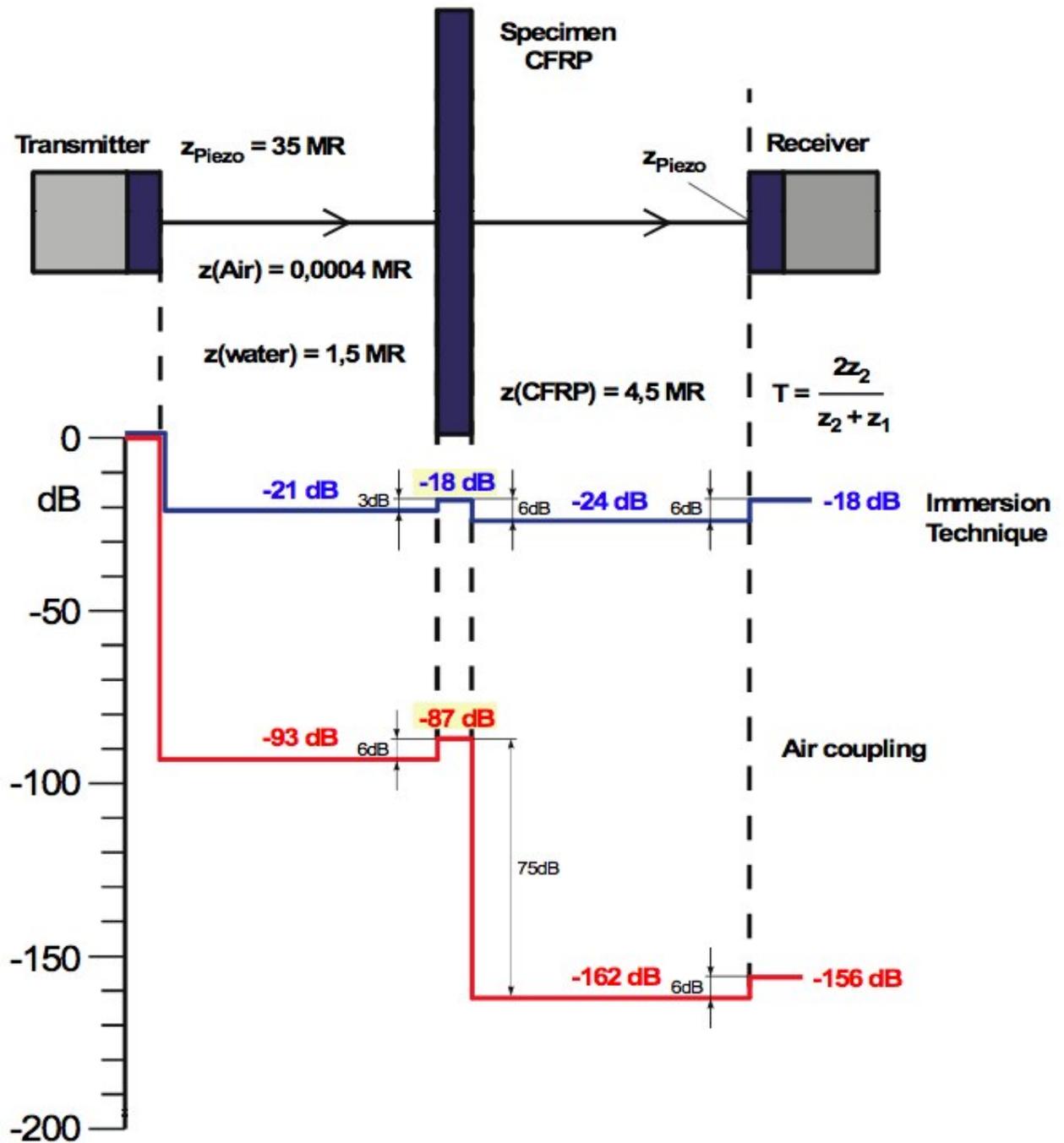


Figura 1.1: Balance de presión acústica en una aplicación END para una pieza de composite con una configuración de transmisión. La figura muestra los datos obtenidos para aire y agua como medios de acoplamiento. Fuente: [2].

transversal) o de los fenómenos de dispersión y absorción producidos por la expansión de la onda esférica y la no homogeneidad del material (diferentes fases de la estructura cristalina, anisotropía o tamaño de grano basto). Pese a su importancia, no son objeto de interés de este trabajo y por ello eludiremos su exposición, habiendo sobre ellos abundante literatura [3–6]. Existe, no obstante, un fenómeno que sí es importante comprender para la motivación de este trabajo, la difracción, cuya explicación se pospondrá para más adelante.

1.1.2. Modos de imagen

El proceso de composición de una imagen ultrasónica no es inmediato. El modo de adquisición de datos de los sistemas ultrasónicos sólo permite capturar una línea en cada disparo lo que exige que la imagen se componga a partir de un largo proceso de adquisiciones consecutivas y de una etapa ulterior de procesamiento que determine los descriptores de interés para la aplicación. El tipo de imagen depende también de la configuración del sistema (transmisión, pulso-eco, tándem, etc.) lo que tiene implicaciones a la hora de interpretar los resultados. Para nuestro interés, nos centraremos en un tipo de configuración pulso-eco donde el transmisor y el receptor es el mismo o, al menos, están contenidos en el mismo plano.

En la figura 1.2, en donde se representa de forma esquemática una inspección con un transductor movido mecánicamente, se describen los distintos tipos de imagen. El primero se trata de la representación unidimensional de la señal acústica sobre una línea temporal que fue el primer modo de representación, surgido en los años 50, y recibe el nombre de A-scan o modo A (*Amplitude Modulation*). Una década más tarde se introdujo el B-scan o modo B (*Brightness Modulation*), que es una representación bidimensional de múltiples señales tipo A con imágenes en escala de grises. Para lograr esta imagen bidimensional se desplazaba mecánicamente el transductor con ayuda de un sistema que registraba su posición espacial, generando una imagen de dimensiones proporcionales al plano inspeccionado. Cuando el espacio barrido es un volumen, se hace evidente la necesidad de trabajar en modos de visualización más elaborados como el C-scan o el D-scan que básicamente consisten en deducir los descriptores de amplitud y posición respectivamente de los principales ecos de cada línea A-scan para combinarlos con las coordenadas espaciales de la adquisición a modo de proyección de la pieza en un plano. Adicionalmente, estos datos pueden combinarse componiendo básicas imágenes 3D que pueden ser de mucha utilidad para la inspección.

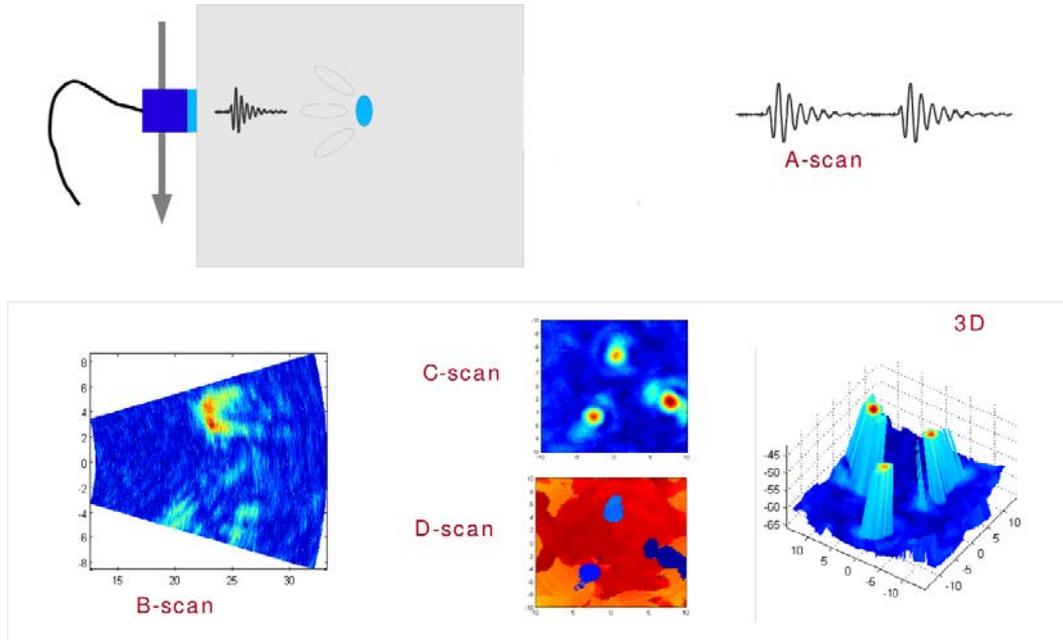


Figura 1.2: Tipos clásicos de imagen para una configuración pulso-eco.

La imagen con sistemas monotransductores presenta una serie de limitaciones. Para realizar el barrido sobre la zona de interés, requiere de un sistema que proporcione el movimiento angular o desplazamiento lineal el cual no es siempre lo suficientemente rápido ni tiene la resolución ni la precisión necesaria. Además, por efecto de la difracción, el sistema sólo es capaz de proporcionar la máxima calidad de imagen a una profundidad determinada, limitando la zona de uso del sistema.

1.1.3. Parámetros de calidad de la imagen ultrasónica

Para comprender cuáles son los parámetros de calidad de la imagen es necesario exponer el concepto de difracción que va a determinar en esencia la capacidad del transductor ultrasónico.

La difracción puede explicarse a partir del principio de Huygens, según el cual un frente de onda se puede visualizar como una sucesión de emisores puntuales que, en respuesta a una oscilación, la vuelven a transmitir contribuyendo así a su propagación. Aunque cada oscilador individual genera una onda esférica, la interferencia de todas ellas da lugar a una onda plana que viaja en la misma dirección que la onda inicial. Bajo esta perspectiva, considerando que la superficie de nuestro transductor está compuesta por

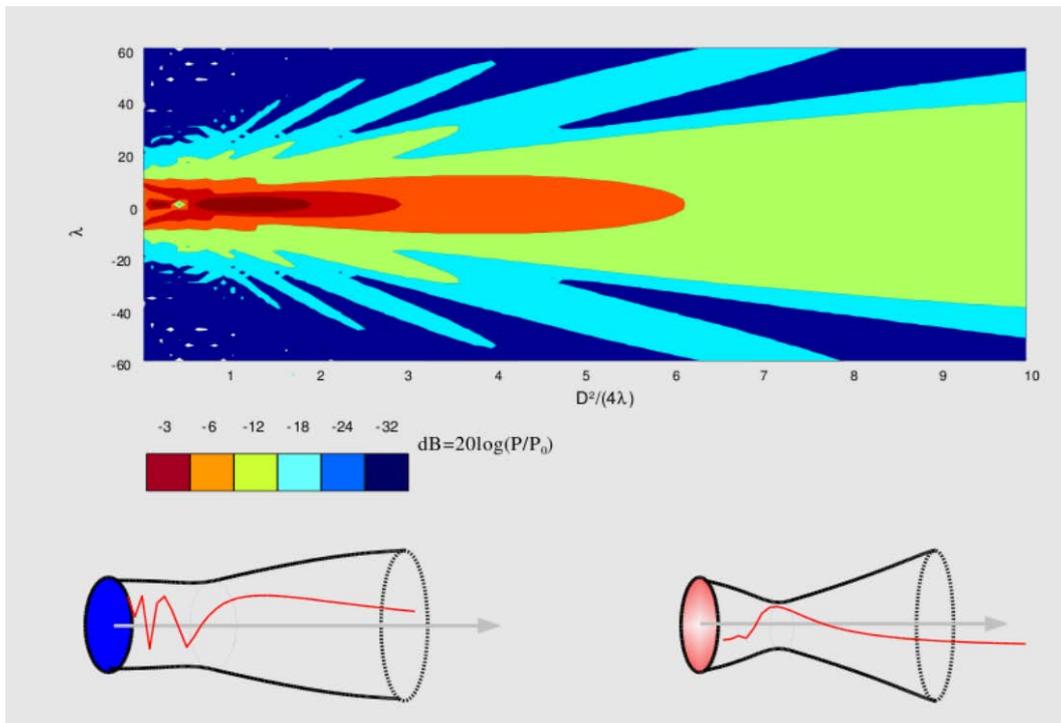


Figura 1.3: Corte transversal del diagrama de radiación de un transductor circular.

infinitos emisores de ondas esféricas, observamos la existencia de bordes en la apertura ¹ que rompen la interferencia generadora de la onda plana, creando a su vez un patrón de difracción dependiente de la geometría de la apertura. En dicho patrón se distinguen dos tipos de elementos diferentes: el lóbulo principal, que es aquel en donde se concentra el máximo de la energía y que viene determinado por la relación entre la longitud de onda de la excitación y el tamaño de la apertura y los lóbulos secundarios los cuales se producen como consecuencia de interferencias constructivas de un orden menor. Estos elementos se pueden ver en la figura 1.3.

Para definir la calidad ofrecida por un sistema de imagen ultrasónica se tienen en cuenta tres parámetros básicos:

- La resolución lateral, que es la capacidad del sistema para distinguir dos deflectores próximos sobre el plano perpendicular a la propagación del haz ultrasónico. Este parámetro viene determinado por la anchura del haz principal y es frecuente dar su valor con el corte sobre el mismo a -6 dB, de tal manera que tomando D como el diámetro de la apertura [4]:

¹Una apertura ultrasónica se define como la superficie total radiante del transductor.

$$\Delta\beta_{-6dB} \approx \arcsin \frac{\lambda}{D} \quad (1.4)$$

- La resolución axial, que es la capacidad del sistema para distinguir dos deflectores próximos en la dirección de propagación del haz. Depende del ancho de banda del pulso ultrasónico de manera que mejora al generar pulsos de pocos ciclos. Con pulsos de corta duración, los ecos procedentes de los deflectores resultarán más claramente distinguibles mientras que los ecos de los pulsos más largos tienden a superponerse, dificultando la detección de elementos muy cercanos entre sí.
- El rango dinámico, que desde el punto de vista acústico viene determinado por el nivel que alcanzan los lóbulos secundarios. Por debajo de ese nivel la presencia de un blanco de baja amplitud es indistinguible del ruido de fondo de la apertura.

En campo lejano, y considerando una excitación de banda estrecha (en la práctica, superior a 10 ciclos), el patrón de difracción puede aproximarse mediante la transformada de Fourier de la forma geométrica de la apertura [4]. Este hecho es muy útil ya que proporciona un modelo simplificado pero muy descriptivo de la capacidad de difracción de la apertura, indicando su funcionamiento en el peor caso, es decir, donde los patrones de interferencia son más acusados. La figura 1.4 muestra la diferencia entre una excitación de banda estrecha y otra de banda ancha para una apertura ultrasónica bidimensional de anillos segmentados.

1.2. TRANSDUCTORES ULTRASÓNICOS

Son los elementos encargados de convertir la energía eléctrica en energía mecánica y viceversa, fenómeno que ocurre naturalmente en determinados cristales y que se conoce por efecto piezoeléctrico. De esta manera, el transductor es el componente del sistema de imagen ultrasónica que introduce y recoge la perturbación mecánica del medio bajo inspección.

Un transductor piezoeléctrico típico consiste en un dispositivo estructurado en capas con una pieza de cerámica piezoeléctrica, dos electrodos, un material de respaldo (generalmente conocido como *backing*) y una o más capas de adaptación (ver figura 1.5 izquierda). Los electrodos deben ser lo suficientemente delgados para que su influencia sea despreciable a las frecuencias de operación. El tamaño y la forma de la cerámica piezoeléctrica determinan cuál es la frecuencia de resonancia del transductor a la cual se alcanza la mayor eficiencia de conversión de energía. La respuesta en frecuencia del

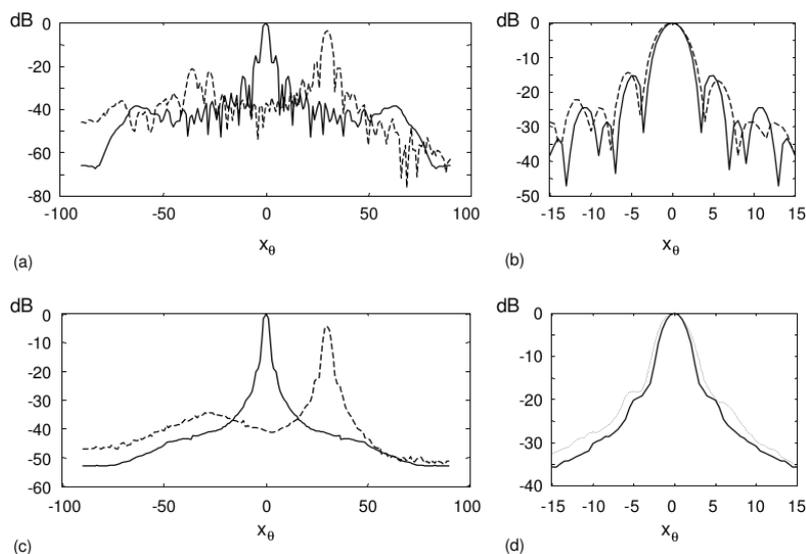


Figura 1.4: Patrón de difracción de banda estrecha y de banda ancha de una apertura de 20λ de anillos segmentados bidimensional compuesta por 302 elementos. Focalizando a 0° (línea continua) y a 30° (línea discontinua). Para banda estrecha, (a) campo de presiones para todo el barrido en elevación y (b) detalle del campo alrededor del foco. Para banda ancha, (c) campo de presiones para todo el barrido en elevación y (d) detalle del campo alrededor del foco.

transductor tiene forma de filtro paso-banda y su ancho determina el rango de frecuencias sobre el cual el transductor puede operar con una eficiencia relativamente alta.

En ocasiones se suele incluir una capa adicional que actúa como lente de focalización y que permite localizar el foco en una zona cercana, mejorando la respuesta de la difracción y aumentando así la resolución lateral. La capacidad de poder controlar el patrón de difracción resulta interesante desde varios puntos de vista. Por un lado, permite cambiar la posición del foco, lo que mejora la resolución lateral a lo largo de toda la zona de interés de la imagen y por otro, permite cambiar la dirección de focalización, deflectando el haz y reemplazando el movimiento mecánico. Para conseguir estos efectos es necesario dividir nuestra apertura en diferentes elementos y controlar de forma sincronizada su forma de actuación, tanto en emisión como en recepción.

Este tipo de aperturas se conocen como *arrays* y se fabrican en base a diferentes procedimientos por medio de la división del transductor en elementos distintos y la implementación de una línea de control y adquisición de datos para cada una de esas divisiones o elementos. En la figura 1.5 se presenta el procedimiento más clásico de fabricación de un array.

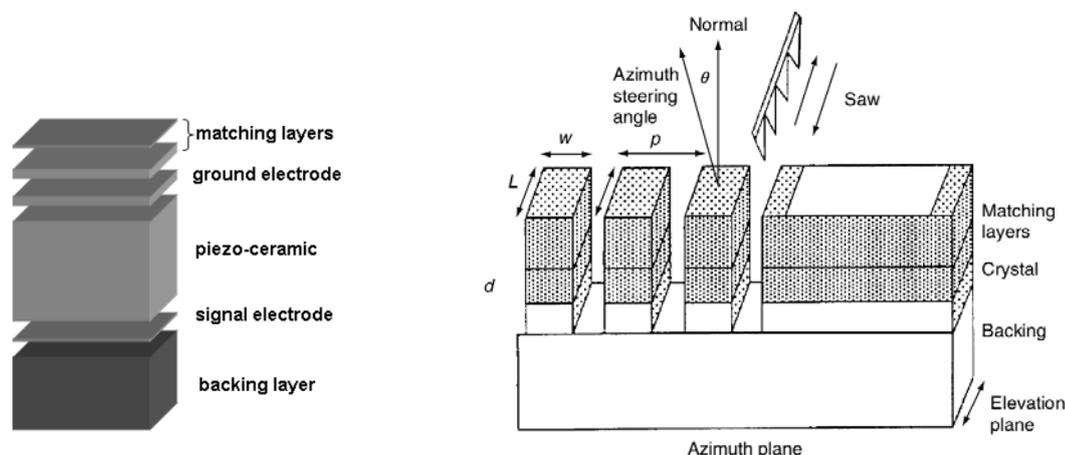


Figura 1.5: Izquierda: estructura clásica de las capas de un array. Fuente: [7]. Derecha: procedimiento típico de fabricación de un array mediante el corte de una estructura multicapa en elementos de un array lineal. Fuente: [6].

En función de la geometría de la división es posible configurar distintos tipos de aperturas con distintos grados de libertad. Así, se puede configurar un array de anillos, con un sólo grado de libertad para focalizar a distintas profundidades; una apertura lineal, en donde los elementos se organizan en una línea ofreciendo dos grados de libertad, uno para focalizar y otro para deflectar el haz en el plano que contiene la apertura y evitando así el movimiento mecánico en ese eje; y una configuración bidimensional, que permite tres grados de libertad al poder deflectar el haz en un volumen. En la figura 1.6 se muestra un array lineal y un array bidimensional.

1.2.1. Sistemas de arrays de transductores

Los sistemas de arrays empezaron a desarrollarse a mediados de los años 70. En 1981, Hewlett Packard lanzó al mercado el sistema de *phased arrays* 70020A, de gran éxito comercial. Los avances en tecnología de materiales y procesos de fabricación (en particular el uso de piezocomposites) así como el incremento de la integración de los componentes electrónicos y su bajo coste, han permitido su desarrollo dando origen a la tecnología actual dominante tanto en el ámbito clínico como en el industrial.

El sistema de control de esta estructura de multitransductores se denomina conformador de haz o *beamformer* y su complejidad está en función del número de elementos que componen la apertura. La técnica básica de conformación se llama *delay-and-sum* y consiste en un alineamiento de las señales sobre distintos puntos de la región de interés

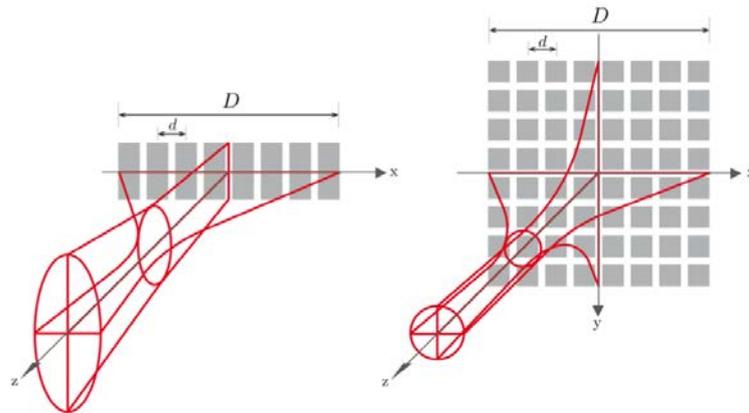


Figura 1.6: Izquierda: Array lineal capaz de barrer electrónicamente un plano; se identifica el haz producido en forma de abanico. Derecha: Array matricial capaz de barrer un volumen; se identifica el haz producido en forma de pincel.

(*Region of Interest* o ROI) para conseguir una suma en fase de las mismas en las posiciones en las que exista un reflector [4]. A este proceso también se le conoce como focalización.

Un *beamformer* está dividido en dos etapas (ver figura 1.7):

- El conformador de haz en emisión se ocupa de sincronizar el disparo de los transductores de tal forma que los frentes de onda se suman en fase sobre una posición concreta de la ROI. Este hecho condiciona la velocidad de adquisición de la imagen puesto que es necesario disparar al menos una vez sobre cada una de la líneas de adquisición en la que hemos dividido la ROI. Desafortunadamente, la máxima calidad de imagen queda limitada a la profundidad de ese foco, teniendo lugar una significativa caída de la presión acústica fuera de esa zona. Para subsanar esta cuestión se divide la adquisición de la línea en varias zonas en donde cada región es focalizada por su propio disparo. Este procedimiento, sin embargo, ralentiza aún más la tasa de imágenes por segundo.
- El conformador de haz en recepción aplica esa misma sincronización en recepción, sobre las señales ya adquiridas y preprocesadas. En este caso, siguiendo la dirección de focalización en emisión, es posible implementar un proceso de focalización dinámica con el que aplicamos distintos retardos a cada canal en función del instante de tiempo de la adquisición. Tras realizar este alineamiento, las señales se suman conformando una línea de la imagen ultrasónica.

Los procesos de conformación de haz pueden ser modulados, tanto en emisión como en recepción, por el empleo de distintas ganancias sobre cada canal consiguiendo así

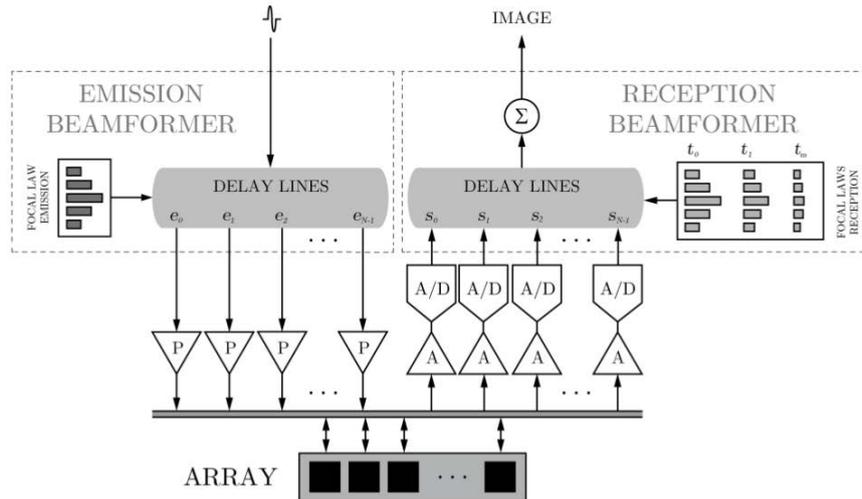


Figura 1.7: Conformador de haz en paralelo. Se distinguen dos etapas: la focalización en emisión, que consta de una red de múltiples pulsers; y la focalización en recepción, que se compone de preamplificadores, convertidores A/D y subetapa de procesamiento de datos.

modificar el proceso de la difracción y alterar el patrón de lóbulos que produce la apertura. Es por ello que el conformador de haz se considera un versátil filtro espacio-temporal con un alto grado de paralelismo sobre el que se pueden adaptar otras técnicas de procesamiento de señal (conformadores de mínima varianza, conformadores adaptativos, etc.). El inconveniente es que para su configuración paralela se precisa una gran cantidad de recursos que son necesarios implementarlos en un hardware específico.

Alternativamente a esta estructura de procesamiento paralelo existen otras basadas en la técnica de apertura sintética o *Synthetic Aperture Focusing Technique* (SAFT) [8], que consiste en adquirir de forma independiente las distintas señales involucradas en el proceso de generación de la imagen y, una vez adquiridas todas, procesarlas de forma conjunta compensando todas las distancias a todos los puntos de la imagen. Este procedimiento, que se conoce como *Total Focusing Method* (TFM) [9], ejecuta al mismo tiempo tanto el proceso de compensación de la emisión como de la recepción, entregando la máxima calidad que estos sistemas de arrays son capaces de proporcionar en toda la ROI. Otra ventaja es que permite alcanzar un compromiso adecuado entre el paralelismo del hardware y el tiempo de adquisición de la imagen y que el procesamiento puede ser implementado sobre un sistema convencional *monocore* o sobre sistemas de procesamiento paralelo como *multicore* o GPGPU. Los inconvenientes que presentan son dos: por un lado, la energía radiada es muy baja al estar producida por un sólo elemento, limitando su capacidad de penetración. Por otro lado, dependiendo del número de elementos de

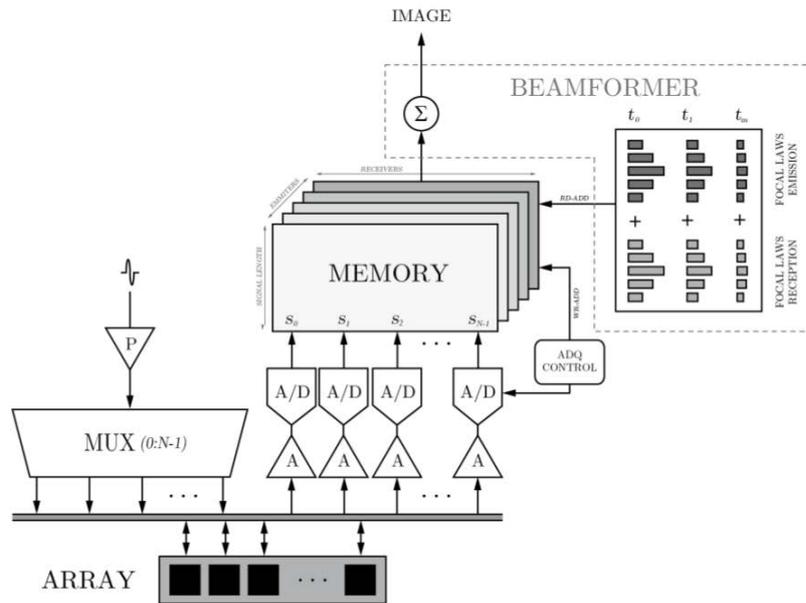


Figura 1.8: Sistema genérico de apertura sintética. Consta de un sólo pulser que en cada disparo se controla un elemento particular a través de un multiplexor. En recepción es posible establecer un compromiso entre el grado de paralelismo que podemos soportar y el número de disparos que se deben efectuar por cada emisor para completar el conjunto de señales necesario para componer la imagen. Los datos son almacenados en la memoria de un procesador convencional y tratados para compensar tanto la emisión como la recepción.

la apertura, el volumen de señales a manejar puede ser ingente. Un sistema genérico de apertura sintética, en donde se identifican las principales partes del sistema, es el que se presenta en la figura 1.8.

1.3. Problemática de la imagen 3D

El objetivo esencial de la imagen ultrasónica 3D es la presentación amigable de volúmenes con capacidad de interacción en tiempo real. Con ello, la interpretación de la imagen es mucho más simple ya que las relaciones espaciales representadas dentro del volumen de insonificación son más obvias, intuitivas y completas con lo se facilita la diagnosis médica o la interpretación de los defectos existentes en un cuerpo. De esta manera, el análisis en múltiples planos y la obtención de imágenes derivadas de diversas superficies resulta más sencillo con esta técnica. En el caso de imagen médica esta ventaja es determinante ya que la probabilidad de encontrar una anomalía en 3D son más altas

Diámetro apertura	14λ	19λ	28λ	40λ	56λ
Resolución lateral	4°	3°	2°	$1,4^\circ$	1°
Elementos array lineal	28	38	56	83	114
Elementos array matricial	784	1444	3249	6724	12996

Tabla 1.2: Evaluación del número de elementos de aperturas de distinto diámetro y tipos de arrays con la resolución lateral que son capaces de alcanzar.

que en el caso de una inspección manual en 2D por la posibilidad de perder u obviar alguna región de interés o no presentar suficiente información.

Tal y como hemos dicho anteriormente, gran parte de la calidad de la imagen depende de la resolución lateral del sistema, y ésta, a su vez, de la relación entre la longitud de onda y el tamaño de la apertura (ver 1.1.3). Por este motivo, es deseable contar con aperturas grandes lo que implica diámetros superiores a 40λ . No obstante, de cara a dividir estas grandes aperturas para construir un array, la difracción a través de una estructura de rejilla periódica produce una interferencia constructiva en ciertas direcciones, formándose lóbulos que reducen drásticamente el rango dinámico de la imagen. A estas interferencias se les conoce como lóbulos de rejilla y pueden ser evitadas si la distancia entre los elementos del array no supera la media longitud de onda [4].

Las implicaciones de este hecho quedan patentes en la tabla 1.2 en donde se muestra el alto volumen de transductores necesarios para componer una apertura bidimensional de alta resolución. Obviamente, hay que considerar que, junto con el problema constructivo de la apertura, están las dificultades de interconexión de la misma, el alto volumen de recursos que precisa (pulsers, conversores A/D, amplificadores, etapas de procesamiento, etc), y la alta impedancia eléctrica (que puede ser superior a $10\text{ k}\Omega$) debido al reducido tamaño de sus elementos, lo cual tiene como consecuencia una baja relación señal-ruido (*Signal to Noise Ratio* o SNR) [6].

La imagen 3D se ha conseguido tradicionalmente mediante el uso de sistemas lineales montados sobre sistemas mecánicos capaz de proporcionar el grado de libertad adicional que les falta. En la figura 1.9 se muestran algunas de estas soluciones con el tipo de barrido que proporcionan. No obstante, estos sistemas carecen de la precisión y calidad que tendría un sistema basado en aperturas bidimensionales y por ello éstas siguen siendo un objetivo tanto científico como tecnológico.

Durante las últimas décadas el desarrollo de sistemas de arrays se ha visto muy reforzado por el desarrollo de materiales piezocomposites, lo que ha permitido considerar nuevas geometrías de distribución de elementos [10–12]. Sin embargo, su desarrollo más significativo ha sido gracias a la tecnología microelectrónica, dando lugar al desarrollo

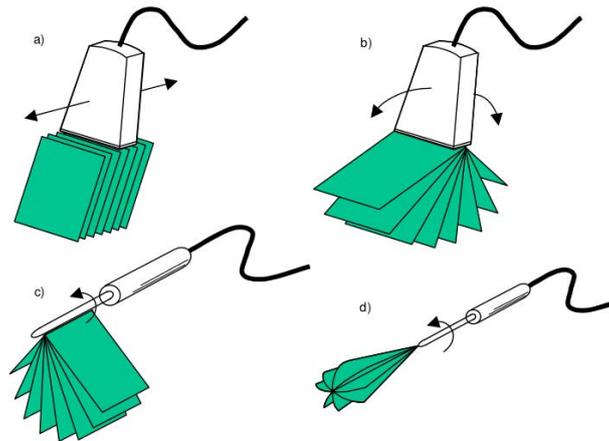


Figura 1.9: Métodos de exploración mecánica. a) Exploración lineal: una serie de imágenes 2D paralelas son almacenadas y usadas para la reconstrucción de la imagen 3D. b) Exploración sectorial: un transductor lineal es girado alternativamente, obteniendo las imágenes 3D a intervalos angulares regulares. c) Exploración sectorial: usa una sonda en la que se aloja un transductor lineal que gira alternativamente. d) Exploración rotacional: se rota un transductor lineal de barrido sectorial, explorando de esta manera un volumen cónico.

de transductores tipo *Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducers* (CMUT). Ello ha supuesto toda una revolución al permitir la fabricación de transductores a través de procesos estandarizados análogos a los dispositivos electrónicos integrados [13]. Esta tecnología ha hecho posible superar parte de los problemas de integración tradicionales y, en base a ella, se han desarrollado algunos prototipos con aplicación en el campo médico (ecografía transesofágica (ETE) y ecografía abdominal [14]). Sin embargo, los CMUTS tienen una pobre respuesta en emisión y su extensión a otros campos de aplicación más industriales no está teniendo una buena acogida. Por otro lado, aunque actualmente es tecnológicamente posible conseguir arrays densamente poblados [15], es evidente que el desarrollo de sistemas que puedan manejar simultáneamente un número tan grande de elementos supone un reto tecnológico.

En los últimos años se han desarrollado distintas estrategias para resolver este problema de complejidad. En el trabajo de Yen [16], se maneja una apertura de 16000 (128x128) elementos activando un subconjunto de ellos (hasta 256 canales en recepción y 169 en emisión) y focalizando sobre el eje central de la misma. De esta forma, multiplexando la subapertura sobre la apertura completa es capaz de componer línea a línea, al estilo del barrido lineal, la imagen volumétrica con relativa baja complejidad pero con un rango dinámico bajo y limitada en su capacidad de barrido a la proyección de la apertura. Un

enfoque semejante pero capaz de barrer mayor superficie es el seguido por Karaman y O'Donnell que proponen emplear el *phased subarray processing* [8, 17]. En este caso, la apertura es dividida en subaperturas que actúan como arrays desfasados que capturan imágenes completas de baja resolución sobre la zona de interés. Así, tras progresivas adquisiciones del mismo plano, se compone una imagen con alta resolución pero con baja tasa de imagen. Otra propuesta se desarrolla sobre el concepto de un *beamforming* separable donde la apertura 2D compone dos arrays lineales en dos planos diferentes que combinan sus haces para reforzar un haz virtual en la intersección de ambos planos [18]. Esta técnica tiene el inconveniente de que introduce serias distorsiones en la imagen en condiciones de foco cercano lo que reduce su resolución. Los trabajos de Chakarabarti se dirigen hacia la resolución de este problema [19].

Una alternativa a los sistemas multiplexados es la utilización de la técnica de *micro-beamforming* que consiste en realizar en recepción un proceso de conformación de haz en etapas [20, 21]. La primera etapa tiene lugar en el propio sensor, donde las señales de grupos de elementos vecinos son alineadas y sumadas entre sí. A continuación, sobre el conjunto de señales resultantes se aplica de nuevo el mismo proceso hasta que el número de señales se hace manejable. La segunda etapa se realiza ya en la unidad de procesamiento en donde se compone la imagen suponiendo que las señales provienen de un array virtual. Existen ecógrafos comerciales que utilizan esta técnica en ecografía abdominal 3D (Philips tiene en su catálogo un sistema con más de 9000 elementos que implementa una reducción de hasta 256 señales) y en ETE (con aperturas de 2025 elementos con una reducción de hasta 225 señales [21]). Los principales inconvenientes de esta técnica son que tiene limitada su capacidad de focalización dinámica a una región muy corta y que incrementa enormemente la complejidad del sensor, la potencia disipada y, en última instancia, su coste. La potencia es relevante según la aplicación y puede llegar a ser un factor limitante. Así es en el caso de la ETE donde un calentamiento excesivo de la sonda puede producir heridas internas al paciente.

En paralelo a estos trabajos hay otra línea clásica de trabajo centrada en la reducción de elementos activos en la apertura [22]. El patrón básico de distribución de una apertura bidimensional es la distribución matricial. Esta tiene a su favor que su desarrollo teórico extiende lo llevado a cabo para arrays lineales, constituyendo un cuerpo muy sencillo y robusto. Así, se han propuesto soluciones tanto en distribuciones estructuradas (cruz de Malta [23] o aperturas de Vernier [24] como no estructuradas (aperturas aleatorias dispersas [25]) que han permitido obtener grados de reducción interesantes a costa de pérdidas significativas en el rango dinámico. Este enfoque se puede observar desde la perspectiva de *Compressed Sensing* (CS) [26, 27], en donde la apertura se trata como un

esquema de muestreo espacial y lo que se propone es buscar una base que lo represente a modo de array disperso [28–30]. Para ello, se plantea un problema de optimización en donde la norma que define la solución viene determinada por [19], es decir, la minimización del número de elementos activos. Siguiendo este planteamiento encontramos una serie de trabajos basados en el *simulated annealing* [29] y los algoritmos genéticos [31]. No obstante, en términos prácticos, cuando hablamos de aperturas de gran tamaño (60λ de diámetro) el número de elementos activos que estas soluciones proporcionan sigue siendo alto. En [32] se hace un análisis general de varias de estas técnicas y se determina que los mejores resultados se obtienen combinando aperturas complementarias en emisión y en recepción al modo de las aperturas de Vernier en distribuciones concéntricas; aquí, para una apertura de tipo medio (25λ), se alcanzan los 60 dB con un número de elementos igual a 1352.

La principal dificultad que encuentran estos esquemas de reducción viene dada por la regularidad de la distribución matricial que colabora a la generación de interferencias constructivas que limitan el rango dinámico, lo que hemos definido anteriormente por lóbulos de rejilla. Frente a esto, algunos autores han optado por buscar soluciones sobre otro tipo de patrones de distribución como son los arrays de anillos segmentados [33], los que siguen un desarrollo en espiral [10, 11], o aquellos que aun manteniendo la distribución matricial como punto de partida mueven ligeramente la posición de sus elementos [12, 34]. El interés de estas aperturas radica en que los elementos se distribuyen en un patrón más denso, sin periodicidades claras, o en que las interferencias constructivas sólo se componen por un porcentaje reducido de elementos. Los mejores resultados se consiguen con las espirales de Fermat (inspiradas en patrones biológicos) que obtienen más de 50 dB de rango dinámico con 256 elementos superando así los resultados de las aperturas matriciales [11]. Otro ejemplo más reciente es Ramalli [35] en donde se plantea el uso de estrategias *tapered-density* para mejorar el diagrama de radiación de la espiral típica de una planta de girasol.

Estos trabajos se basan fundamentalmente en el desarrollo de algoritmos computacionales y en pocas ocasiones se llega a presentar prototipos reales. Dado el alto coste computacional para encontrar una apertura, el desarrollo y la optimización de estos modelos es un tema de trabajo recurrente en la literatura científica y ha permitido obtener modelos de simulación muy buenos. No obstante, en la mayoría de los casos se echa en falta una verificación experimental motivada por la alta inversión económica que hay que realizar para fabricar uno de estos prototipos. Se estima que desarrollar una apertura de 128 elementos basada en tecnología de piezocomposites puede tener un coste superior a 20000 €. Este valor es aún superior si hablamos de un desarrollo en tecnología CMUT. Es

sobre esta última problemática, la construcción de prototipos de arrays bidimensionales dispersos, sobre la que se centra este trabajo.

1.4. OBJETIVOS DEL TRABAJO

El objetivo principal de este trabajo es construir y caracterizar un transductor de arrays 2D experimental de bajo coste, desarrollando durante el proceso un procedimiento para la fabricación de forma económica y flexible de prototipos de arrays bidimensionales.

Se pretende así avanzar en el diseño de nuevos patrones alternativos a los arrays 2D clásicos que sean capaces de generar imágenes tridimensionales de buena calidad y con pocos requerimientos de construcción. Para ello, partimos de una apertura sencilla de 64 elementos diseñada a partir de una espiral de Fermat así como de una serie de limitaciones constructivas que serán comentadas a lo largo de la memoria. El desempeño del dispositivo ha de ser lo suficientemente bueno para poder visualizar una imagen de geometría sencilla, por ello se medirán y contrastarán una serie de parámetros como son el ancho de banda, la sensibilidad y el acoplamiento electromecánico entre elementos.

La memoria de este trabajo está dividida en una serie de capítulos que ayudarán a centrar la exposición de los pasos necesarios para la consecución de este objetivo:

- En el capítulo 1 se realiza una introducción en la que se describen los principios teóricos de la imagen ultrasónica y la importancia y problemática de la imagen tridimensional.
- En el capítulo 2 se exponen las dificultades que rodean al diseño y fabricación de arrays ultrasónicos bidimensionales. Además, se presentará la apertura a construir mediante modelos de simulación que sirvan de referencia para la comparación con el prototipo experimental.
- En el capítulo 3 se explica el procedimiento de construcción del array. Se describe el procedimiento de trabajo para el desarrollo de un prototipo de aperturas experimentales de bajo coste. Para ello, se aplicarán técnicas de prototipado rápido de impresión 3D, punto que constituye una de las principales novedades aportadas en este trabajo.
- En el capítulo 4 se caracteriza el prototipo a partir de un protocolo de medidas que permitirán evaluar el desempeño tanto del modelo final como de los pasos intermedios realizados para su consecución.

- Por último, en el capítulo 5 se extraen conclusiones sobre la bondad del procedimiento y sobre sus limitaciones. Además, se exponen líneas de trabajo futuro.

Capítulo 2

ARRAYS DISPERSOS

2.1. DISEÑO DE ARRAYS BIDIMENSIONALES

Tal y como ya hemos mostrado, las capacidades que pueden ofrecer los arrays de transductores bidimensionales para producir imagen tridimensional están condicionadas por el tipo de distribución de elementos y la distancia máxima entre los mismos. En general, esta distancia no debe ser superior a media longitud de onda. En caso contrario, se producirá fuera de la dirección focal una nueva interferencia positiva entre los frentes de onda de los distintos transductores que alinea a los mismos en ciclos consecutivos, produciendo una interferencia constructiva (el primer ciclo de un frente coincidirá con el segundo de otro frente y así sucesivamente). En la práctica, esto genera un nuevo haz acústico cuya amplitud está en función de la longitud del pulso y del número de transductores que colaboran a su formación. En este sentido, la amplitud del lóbulo de rejilla será menor cuanto menos elementos contribuyan y cuanto más corto sea el pulso.

Considerando que la respuesta a la difracción en onda continua de una superficie radiante puede obtenerse mediante la transformada de Fourier bidimensional, podemos hacer uso del teorema de *Slice Projection* [36] para disponer que en una dirección determinada la respuesta de la difracción va a venir condicionada por la posición proyectada de los elementos sobre el eje que corta la apertura por el centro de referencia y se alinea en la dirección deseada. A la apertura lineal que la proyección de los elementos dibuja sobre este eje se le conoce como *array lineal equivalente* y determina la estructura del patrón de radiación en la dirección que lo contiene.

Así, tomando como ejemplo la apertura matricial de $N \times N$ elementos, referencia básica en el diseño de aperturas bidimensionales, se observa que ésta es una distribución

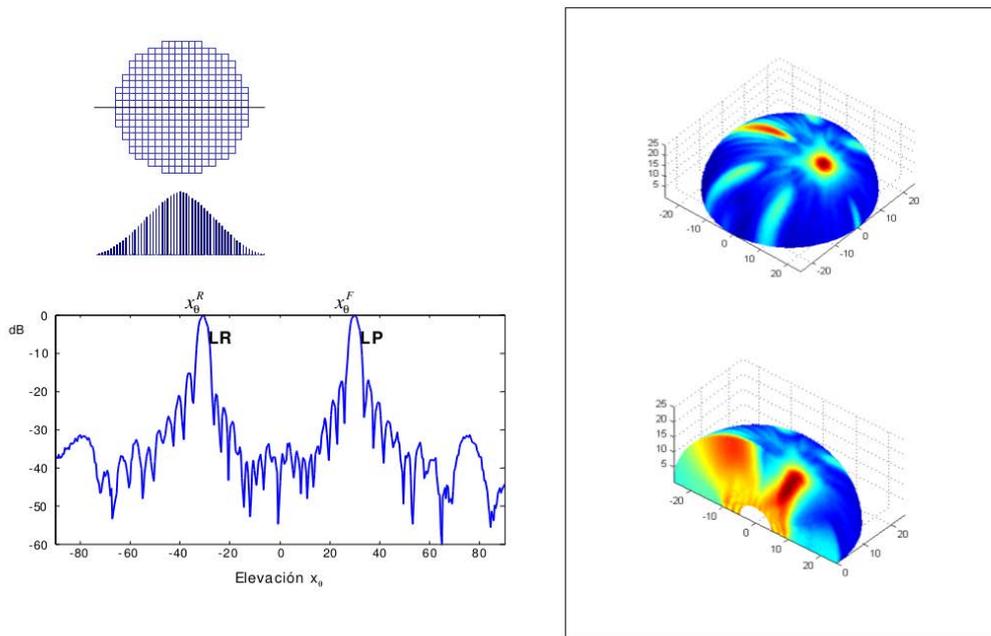


Figura 2.1: Patrón de difracción de una apertura matricial de 20λ con una distancia entre elementos de 2λ . El campo ha sido deflectado para hacer patente las direcciones principales en las que se forman los lóbulos de rejilla.

fuertemente periódica en donde la equidistancia entre elementos es patente principalmente en los dos ejes cartesianos del plano que la contiene. En cualquiera de estos ejes el array lineal equivalente se dibuja como un array periódico en el que cada elemento está compuesto por N transductores (correspondientes a la fila/columna ortogonal), de tal manera que si la distancia entre elementos es superior a $\lambda/2$ ésta generará fuertes lóbulos de rejilla, estando cada colaboración multiplicada por N . En la figura 2.1 se muestra el campo producido con una excitación de banda ancha del 50 % por una apertura matricial de 20λ y un espaciado entre elementos de 2λ . Si deflectamos el campo vemos cómo estos lóbulos se forman claramente en las direcciones en donde la periodicidad es más evidente. Esto ocurre en los ejes principales y en las diagonales en donde los arrays lineales equivalentes recogen sobre cada posición efectiva la mayor concentración de elementos.

Tomando un haz principal deflectado en la dirección θ_F , los lóbulos de rejilla aparecen sobre las direcciones [4]:

$$\theta_R = \pm \arcsin \left(\frac{\lambda}{d} - \sin \theta_F \right) \quad (2.1)$$

Siendo d la distancia entre elementos consecutivos.

Las alternativas para reducir los lóbulos de rejilla son las siguientes:

- Garantizar una distancia máxima entre elementos de $\lambda/2$. Esto da lugar a aperturas muy densamente pobladas, lo que constituye su principal problema.
- Emplear excitaciones de banda muy ancha (*UltraWide Band*) [10]. Aunque es habitual hacer uso de este tipo de excitaciones (los piezocomposites alcanzan valores entre el 60% y el 70% y, en el caso de los CMUTs, es posible alcanzar anchos de banda cercanos al 100%), su impacto es limitado. El incremento del ancho de banda ayuda a minorar la interferencia entre elementos consecutivos en el array lineal equivalente pero no compensa aquellos que se colocan sobre la misma posición.
- Emplear distribuciones de elementos que rompan la periodicidad o que minimizen la coincidencia en la proyección de los elementos sobre el array lineal equivalente.

Sin despreciar la importancia del ancho de banda, el diseño de arrays se basa justamente en este último punto, es decir, en buscar distribuciones de elementos que permitan reducir el número de elementos activos en aperturas grandes sin que por ello se sacrifique su rango dinámico. En definitiva, se trata de encontrar un compromiso entre calidad y complejidad.

2.1.1. Diseño de arrays dispersos

Esta problemática es común a varias áreas tecnológicas o científicas en donde se hace uso de estructuras de transductores multielemento como es el caso de las radiocomunicaciones o la óptica. Aunque cada una de estas áreas tiene sus propias particularidades dada la diferente naturaleza de los fenómenos físicos que las definen, lo cierto es que pueden compartir soluciones a este problema.

Los primeros trabajos partían de aperturas matriciales en las que se eliminaban de forma aleatoria un número significativo de elementos. Estas aperturas mantenían la distribución de $\lambda/2$ y los planteamientos de diseño se centraban en definir estrategias de reducción para componer una distribución uniforme de elementos activos que mantuviera las características básicas de la apertura con un mínimo de recursos [22]. Algunas estrategias dividían la estructura en dos subconjuntos, uno para emisión y otro para

Array	N° emisores	N° receptores	N° total	lóbulo de rejilla
Array Pleno	1804	1804	1804	-69.6dB
Vernier	421	208	581	-39.9
Vernier Radial	523	373	837	-56.9
Bin Array Matriz	447	447	894	-51.6
Bin Array Polar	484	361	845	-48.5

Tabla 2.1: Resultados obtenidos para varias distribuciones de elementos en una apertura de 25λ de diámetro. Los resultados muestran el número de emisores, de receptores y el número total de elementos en la apertura, así como el nivel de pico de los lóbulos de rejilla. Fuente: [32].

recepción, analizando distintos grados de solapamiento [25]. Coordinar la acción de emisión y recepción para obtener una mejora en el diagrama de radiación del sistema ha sido otra estrategia que ha tenido cierto éxito. Se basa en conseguir que, mientras que los haces principales de emisión y recepción se localizan sobre la misma dirección, los lóbulos secundarios y los de rejilla no coincidan en la misma posición. Este es el caso de la Cruz de Malta [23] y de las aperturas de Vernier en las que el nivel máximo de los lóbulos de rejilla en emisión coinciden con un mínimo de los mismos en recepción y viceversa. Este esquema es suficientemente versátil y se puede adaptar a varias estrategias de reducción, la tabla 2.1 muestra algunas de las soluciones presentadas por Austeng en [32] para un array de perfil circular con un diámetro de 25λ .

La primera apertura hace referencia al array pleno, las dos siguientes a distintas configuraciones de Vernier (el convencional y un Vernier ejecutado sobre el eje radial) y las dos últimas hacen referencia a configuraciones *binned array*, que básicamente son arrays con distribución aleatoria por regiones distribuidas de forma matricial y de forma polar, respectivamente. Estas últimas no solapan los elementos de su apertura de emisión y de recepción. Es importante hacer notar que todas estas configuraciones mantienen en esencia la distribución de $\lambda/2$ como base de partida. La tabla 2.1 hace patente que es posible obtener reducciones por debajo de 50dB pero a costa de reducciones bajas (ligeramente superiores al 50%) y que la forma de la distribución de los mismos es un factor clave para conseguir optimizar el resultado (por ejemplo, la configuración Vernier radial con un número de elementos inferior a las *binned* obtiene casi 6dB más de rango dinámico).

Estas soluciones, no obstante, aún precisan de un número alto de elementos para mantener un rango dinámico aceptable. La distribución de partida para estas soluciones se basa en el patrón matricial en donde el grado de coincidencia de los elementos sobre

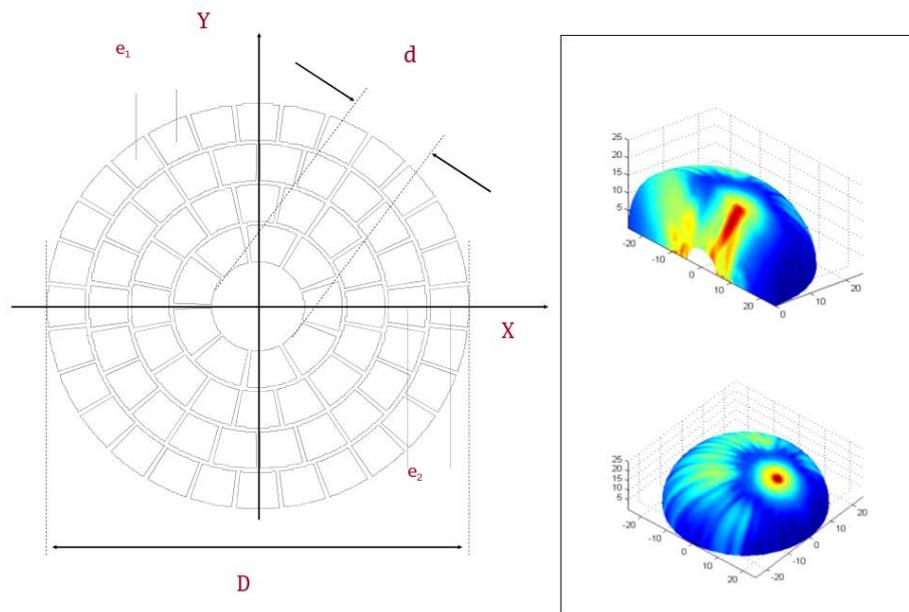


Figura 2.2: Patrón de difracción de una apertura de anillos segmentados de 20λ con una distancia entre elementos de 2λ . El campo ha sido deflectado para hacer patente las direcciones principales en las que se forman los lóbulos de rejilla.

el array lineal equivalente es alto. Esta característica, conocida como *shadowing*, puede ser alterada si en vez de partir de distribuciones matriciales se buscan otro tipo de geometrías.

Este es el caso de las aperturas de anillos segmentados y de las aperturas de espiral. La figura 2.2 muestra el campo producido por una apertura de anillos segmentados que puede ser comparado con la apertura matricial de la figura 2.1. A diferencia de la apertura matricial, los lóbulos de rejilla están más distribuidos y alcanzan niveles más bajos debido a que no todos los elementos colaboran al mismo tiempo en su formación sobre una misma dirección. El patrón de distribución puede ser aún más disperso y permitir elementos más grandes en lo que respecta a sus dimensiones, lo que aumenta el área radiante.

2.1.2. Diseño de arrays basados en espirales de Fermat

Unas consideraciones semejantes pueden hacerse respecto a las aperturas en espiral. Los trabajos de [11] y [35] proponen el uso de espirales basadas en la de Fermat como base de diseño.

Una espiral de Fermat queda definida por su ángulo de divergencia (α_0) que determina la distancia angular entre dos elementos consecutivos. En coordenadas polares, la posición radial del centro de cada elemento x_n se calcula según:

$$x_n = (R_n, \alpha_n) = (R_0\sqrt{n\alpha_0}, n\alpha_0), \quad n = 0, \dots, (N - 1). \quad (2.2)$$

Donde N es el número total de elementos y R0 es una constante cuyo valor está relacionado con el tamaño de la apertura:

$$R_0 = \frac{D}{2\sqrt{(N - 1)\alpha_0}}. \quad (2.3)$$

Siendo D el diámetro de la apertura deseada. En [11] se hace un análisis en profundidad de este tipo de apertura. Los motivos que hacen que esta distribución sea interesante son:

- Tiene un proceso de definición sencillo. Sólo se necesita conocer el ángulo de divergencia y el número de elementos para definir su geometría.
- Se trata de un patrón de inspiración biológica capaz de ofrecer una apertura de despliegue circular de tamaño aceptable, con poca periodicidad y un número limitado de elementos activos.
- Aunque la figura forme tan solo una espiral, los elementos se organizan internamente en ramas que dibujan nuevos patrones de espirales. Este hecho, distribuye la periodicidad en diferentes direcciones y, en consecuencia, reduce el nivel de contribución de los elementos en la creación de lóbulos de rejilla los cuales se extienden a lo largo de una extensa región con una amplitud moderada.
- En las espirales de Fermat, en comparación con otro tipo de espirales, los elementos situados en el exterior de la espiral presentan una mayor compacidad radial y una buena dispersión angular. Esto distribuye los elementos de tal forma que mejora el efecto de shadowing.

La figura 2.4 muestra algunas de las distribuciones seleccionadas como las mejores para 256 elementos con diámetros de 50λ y 60λ , así como un caso paradigmático, el

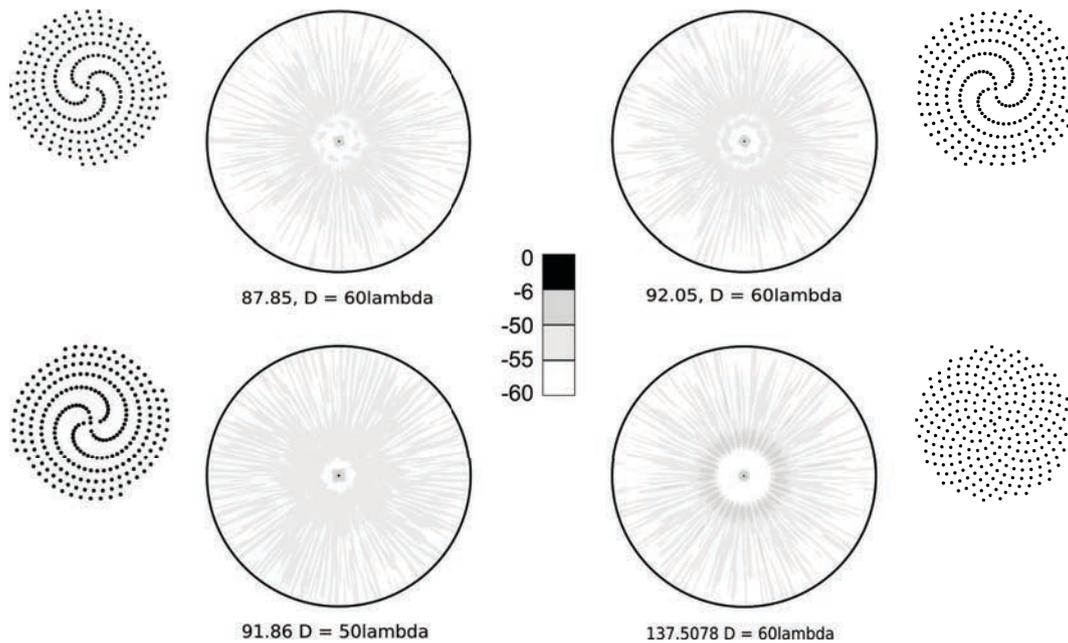


Figura 2.3: Distribuciones de Fermat para 256 elementos con distintos ángulos de divergencia y valores de diámetro. En la figura se muestra el patrón de difracción que generan estas aperturas. Todos los casos superan los 50 dB de rango dinámico salvo el *golden angle*. Fuente: [11]

ángulo de distribución de las semillas del girasol llamado también *golden angle* (137.5078). Las simulaciones de campo acústico (con un 60% de ancho de banda) muestra que todas las aperturas, salvo el *golden angle*, muestran un rango dinámico por encima de los 50 dB. Si lo comparamos con los resultados de la tabla 2.1 se observa que con un número de elementos significativamente menor somos capaces de hacer operar una apertura de doble tamaño que la presentada por [32].

2.2. TECNOLOGÍAS PARA LA FABRICACIÓN DE ARRAYS

El estado del arte en diseño de arrays es extenso y está basado fundamentalmente en el desarrollo de modelos matemáticos. De hecho, hay una línea de trabajo muy intensa en el desarrollo de estos modelos motivada por su alto coste computacional [37]. Sin embargo, el análisis de la bibliografía existente denota que pocos de estos modelos se plasman en prototipos reales.

El coste de desarrollar estos prototipos es caro, pudiendo alcanzar fácilmente los 20000 € para una apertura simple de 128 elementos y son muchos los problemas de fabricación que pueden surgir cuando se trabaja sobre aperturas tan complejas, con lo que la inversión realizada puede darse por perdida con facilidad.

El procedimiento general de fabricación de un transductor está bien documentado en la literatura, pero la realidad es que es un proceso de *cocina* en donde hay infinitos pequeños detalles y pasos no documentados que hacen que la *receta* funcione mucho más eficientemente. En general, cada laboratorio mantiene un discreto silencio sobre cuáles son sus procesos y los materiales que emplea.

Dejaremos de lado los trabajos sobre transductores capacitivos tipo CMUT por estar fuera de los medios tecnológicos de los que disponemos, ser excesivamente caros y porque, a día de hoy, sigue siendo una tecnología de prototipo más que una realidad comercial. Así, nos centraremos en la fabricación de transductores basada en cerámicas piezoeléctricas.

Los diseños iniciales que se muestran en la literatura [38–42] usan una estructura monolítica y elementos relativamente grandes, para aplicaciones de 1 a 2 MHz, con propagación en sólidos cuya longitud de onda es considerablemente superior que en líquidos. En principio, la forma del elemento en un array monolítico se define por la forma del electrodo que está conectado a la cerámica. Sin embargo, con este tipo de fabricación, existe un fuerte acoplamiento mecánico y eléctrico entre elementos vecinos [43]. Para evitarlo, se corta la cerámica siguiendo el patrón del electrodo quedando así los elementos separados. Aunque es aconsejable aislar los elementos entre sí, dada su irregularidad geométrica no es posible realizar esta operación con herramientas convencionales, como son las fresas de disco. Otras soluciones, como podría ser la utilización de técnicas láser, producen despolarización, son caras y deterioran la resonancia del material piezoeléctrico.

Una alternativa a la división de la apertura en elementos mediante corte directo consiste en utilizar material piezo-compuesto tipo 1-3 ¹ como base del array. Para fabricar el composite, se mecaniza el material formando una malla de columnas cuadradas idénticas entre sí mediante cortes de paso mínimo para que no se pierda excesivo material (por ejemplo, utilizando columnas de ancho de entre 0.2 mm y 0.3 mm con un corte de disco de 0.05 mm de espesor). A través de un procedimiento sencillo que emplee fresas de disco convencionales de 0.03 mm se puede conseguir columnas de 0.15 mm de ancho con una pérdida de material que ronda el 30 %. Al igual que se hacía de forma clásica, una vez realizado el corte, sobre el disco base de material el elemento queda dibujado

¹Los piezocomposites se clasifican de acuerdo a su conectividad. Un piezocomposite tipo 1-3 indica que la fase piezoactiva es continua a través de sólo una dimensión mientras que la fase matriz es continua a través de las tres dimensiones.

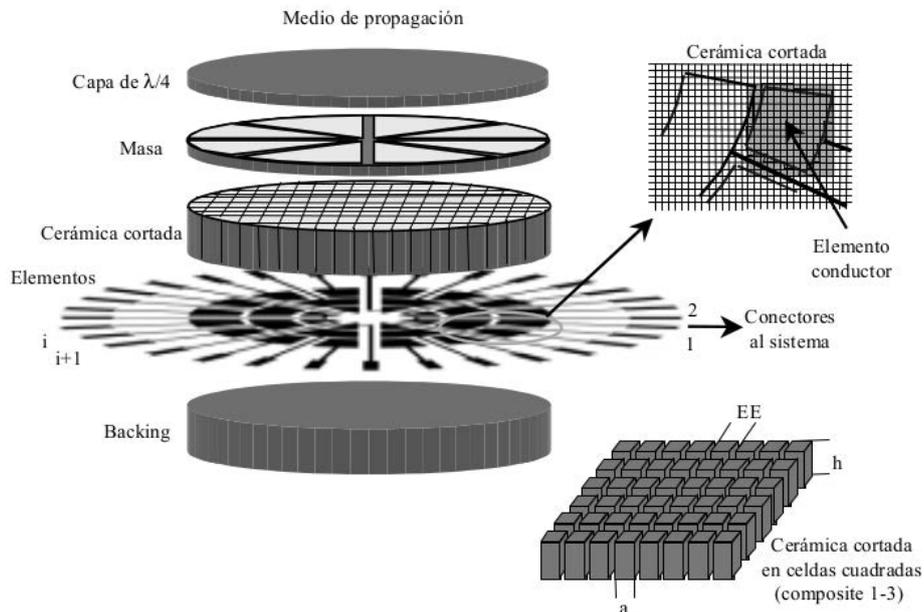


Figura 2.4: Proceso de fabricación de un array de anillos segmentados con cerámica piezocomposite. Fuente: [45]

a partir de la forma del electrodo que se traza en un circuito flexible junto a las pistas de interconexión. Este circuito se compacta sobre la cerámica mediante un bloque de backing que ayuda a amortiguar el pulso proporcionando, a su vez, ancho de banda a la señal emitida.

Finalmente, en la parte frontal se coloca el plano de masa, convenientemente preparado para que no suponga un espesor adicional que pueda interferir en el trazado de las pistas. Sobre él se monta la capa de adaptación de grosor $\lambda/4$. Esta técnica está bien documentada en [44] en donde se expone el proceso de fabricación de un array de anillos segmentados de 64 elementos.

La parte delicada del proceso es el trazado de las pistas y del plano de masa correspondiente, que puede llegar a ser muy complejo si el número de elementos es muy elevado. Por otro lado, hay que tener en cuenta que el elemento debe contener al menos 3×3 columnas piezoeléctricas para garantizar cierta capacidad de vibración.

La principal traba en el desarrollo de piezocomposites está en el tamaño de corte alcanzable (es difícil superar los $25 \mu m$) lo que en la práctica limita su frecuencia de operación. Pero además hay que considerar el hecho de que el estrés mecánico al que se ve sometida la cerámica durante el proceso de corte puede ser causante de pérdidas en la

polarización en las zonas cercanas al corte lo cual degrada las capacidades del sensor. Con el objeto de superar esta limitación, en los últimos años se está realizando un fuerte esfuerzo en otras técnicas de fabricación basadas en procesos de manufactura aditiva (principalmente, impresión 3D) con evidente éxito [46, 47]. La importancia de esta línea de trabajo, expandida no sólo a la fabricación del piezocomposite sino a todo el resto de la estructura del transductor, puede dar lugar a la aparición de nuevas herramientas para poder manejar la complejidad de las aperturas bidimensionales además de suponer un abaratamiento considerable de los sensores.

2.3. DISEÑO DE REFERENCIA

Como ya expusimos anteriormente, el objetivo de este trabajo es desarrollar un procedimiento de fabricación. Para ello hemos decidido reducir parte de la complejidad del proceso tomando como base una apertura de 64 elementos y una frecuencia de operación de no más de 1 MHz. Otra limitación autoimpuesta por cuestiones constructivas es el diámetro de la apertura, que no puede ser superior a los 60 mm.

La estrategia de diseño parte de la distribución en espiral de Fermat. Se ha tomado un criterio de selección que se basa en la búsqueda de aquellos ángulos de divergencia que minimizan angularmente el efecto de shadowing. Este criterio es consecuencia de las conclusiones presentadas en [10].

2.3.1. Selección de la apertura

Inicialmente la tendencia era resolver esta cuestión mediante una búsqueda intensiva de la apertura más conveniente [11]. Este mismo proceso es la base para desarrollar un trabajo de exploración de patrones que permita identificar los parámetros de calidad de la apertura. A día de hoy, la solución más adecuada se determina estableciendo un proceso de análisis de la composición del shadowing.

En este sentido, el criterio de búsqueda ha sido que, una vez dividida la apertura en dos conjuntos consecutivos de 32 elementos, los elementos estén separados angularmente 180° de tal forma que cada par elementos queden alineados de 32 en 32 sin que se produzcan más coincidencias. De este modo, si se introdujese un elemento virtual 64 + 1, éste quedaría alineado con el elemento 1.

$$k * \pi = \alpha_1 - \alpha_{33} \quad (2.4)$$

$\alpha(^{\circ})$	valor de pico LR	valor de media LR
84.375	-34	-40
95.625	-34.8	-40
129.375	-32.16	-38.8
140.605	-34.8	-40
151.875	-32.2	-38.5

Tabla 2.2: Nivel de lóbulos para distintos ángulos de divergencia de una espiral de Fermat de 64 elementos medido en el ángulo de elevación.

Donde k es una constante impar.

Dentro del espacio de $\alpha \in [0, \pi]$ el número de aperturas que cumplen esta condición es de 17. Aunque no todas estas aperturas son viables, sí supone una reducción significativa en el número de casos frente a un conjunto determinado por los infinitos valores que puede tomar α . No obstante, este conjunto se puede reducir aún más si se aplica una segunda condición que va a venir determinada por aspectos constructivos. Con el fin de conseguir espacio físico para el montaje hemos propuesto que los elementos mantengan la mayor distancia posible entre elementos. Este valor es 3.75 mm, lo que supone un espaciado mínimo de $2,5\lambda$, considerando que tenemos una λ mínima de 1.5 mm (para una frecuencia máxima de trabajo de 1 MHz en medio agua).

Con estas condiciones el conjunto de posibles soluciones se reduce a cinco: 84.375, 95.625, 129.375, 140.605 y 151.875. Para la modelización de su comportamiento hemos hecho uso de un método de simulación basado en elementos puntuales, evitando así el efecto de la difracción del elemento. Con ello se obtiene información precisa de la distribución de los lóbulos de rejilla, con un 60% de banda ancha [11]. Se muestra un resumen de los resultados de las simulaciones en la tabla 2.2, en donde se indica el valor máximo de los lóbulos de rejilla y el valor de pico del valor medio de los lóbulos medidos en el ángulo de elevación. Claramente hay tres aperturas que muestran un mejor comportamiento: la 84.375, la 95.625 y la 140.605.

En la figura 2.5, se observa cómo se organiza la distribución de elementos en las tres aperturas, etiquetadas como 84, 95 y 140, respectivamente. En la figura 2.6 se presenta el campo acústico que éstas producen, focalizando sobre el eje central a la mitad de la distancia del campo lejano. En la izquierda se muestra un diagrama de nivel del campo acústico de la semiesfera sobre el plano focal con especial detalle entre -33 dB y -36 dB por ser la franja en donde aparecen los primeros lóbulos de rejilla. En la derecha se muestran tres cortes laterales en los que para cada grado de elevación se indica el valor

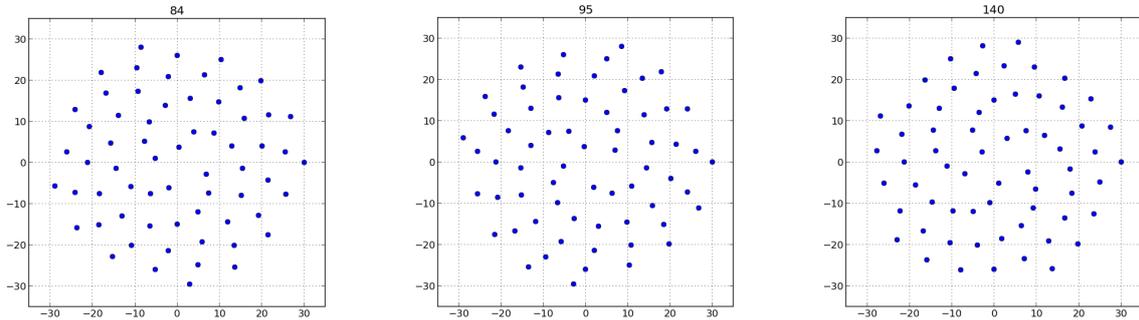


Figura 2.5: Distribución de espiral de Fermat para 64 elementos con distintos ángulos de divergencia $\alpha(^{\circ}) = 84, 95$ y 140 y el mismo diámetro.

de pico de los lóbulos de rejilla (línea azul), la media (línea verde) y el mínimo (línea roja).

Si observamos el eje principal podemos ver cómo los tres perfiles se mantiene alineados durante $1,5^{\circ}$, que corresponden con la resolución lateral para una apertura de estas características, con un rango dinámico de 24 dB. A partir de este punto el haz va perdiendo este alineamiento alcanzando un esparcimiento del 15% con un máximo de 2° a los 30 dB de rango dinámico y del 9% con un máximo de $2,4^{\circ}$ a los 34.8 dB. Por encima de este valor, los lóbulos de rejilla enmascaran el haz principal.

Los resultados obtenidos son consecuentes con el trabajo de [11]. Las aperturas 84 y 95 se sitúan alrededor de una región en donde, debido a una singularidad en el alineamiento de los elementos, las distribuciones minimizan su nivel de lóbulos. Los resultados de la apertura 140 son coincidente con otros trabajos internos del grupo de investigación en el que se desarrolla este trabajo. Aunque las tres son candidatas para el desarrollo de nuestro prototipo, en este primer trabajo hemos tomado como referencia la apertura 140.

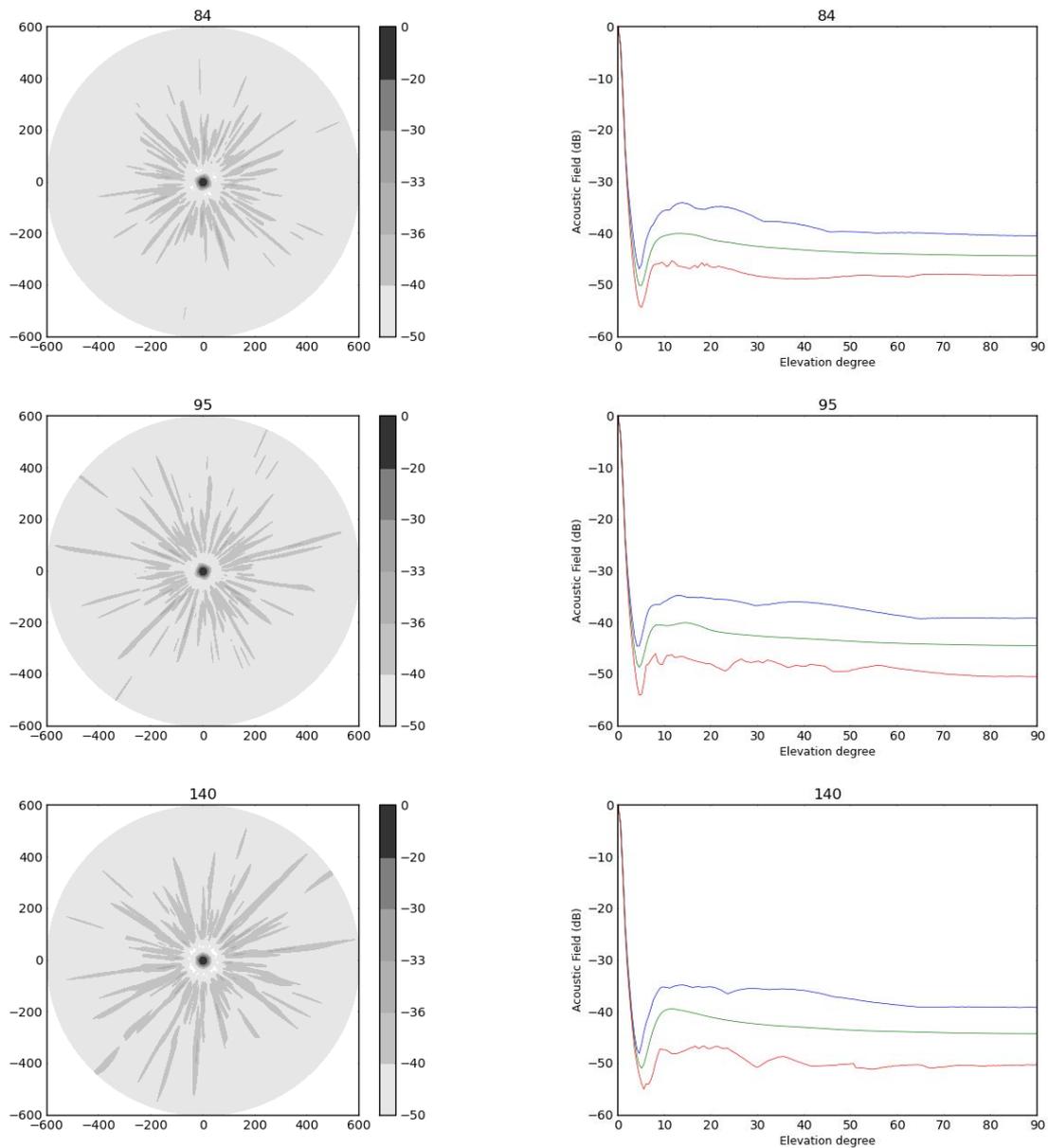


Figura 2.6: Patrones de difracción generados por las aperturas con $\alpha(^{\circ}) = 84, 95$ y 140 . Se muestra el campo acústico de la semiesfera sobre el plano focal (izquierda) y el perfil lateral del máximo, medio y mínimo nivel de pico de los lóbulos de rejilla, medidos en el ángulo de elevación (derecha).

Capítulo 3

FABRICACIÓN DEL TRANSDUCTOR: MATERIALES Y METODOLOGÍA

3.1. PROTOTIPADO RÁPIDO

La técnica de prototipado rápido o RP (*Rapid Prototyping*) surge a finales de los años 80 como una nueva filosofía en el mundo del desarrollo de productos industriales. Ha ido ganando una gran popularidad debido a la flexibilidad que ofrece a la hora de fabricar piezas complejas de forma rápida y económica y sin necesidad de usar moldes, herramientas o maquinaria específica.

El RP sigue los principios del prototipado industrial al ser un medio para acelerar las etapas más tempranas del desarrollo de un producto, en las que suele haber implicadas múltiples fases y modificaciones, y llegar así más rápida y eficientemente a una solución óptima. Con ello se consigue ahorrar tiempo y dinero en el desarrollo de un producto y permite obtener un primer prototipo sin depender de terceros y hacer cambios de diseño desde nuestro propio laboratorio o taller. Está basado en la manufactura aditiva, también conocida como AM (*Additive Manufacturing*), que consiste en la generación progresiva de las piezas capa a capa. Esta forma de manufactura contrasta con los métodos tradicionales de producción, sustractivos o por molde (*casting*), los cuales llevan asociados una serie de inconvenientes (limitaciones de diseño, utilización de herramientas específicas, necesidad de ensamblaje, excesivo gasto de material) que el RP consigue evitar.

A través de esta técnica de fabricación es posible producir modelos en diferentes materiales tales como el metal, la madera, la cerámica o el plástico a partir de un diseño CAD (*Computer-Aided Design*). Durante las últimas décadas, el prototipado rápido se ha estado usando en la manufactura de piezas individuales o de prueba, en herramientas y en moldes para aplicaciones de relleno o forma. Sin embargo, gracias a los avances en las tecnologías implicadas, recientemente ha ganado importancia en el desarrollo de productos finales con plena funcionalidad. Además de posibilitar una reducción en el tiempo de producción y un ahorro en los costes, el RP:

- Permite evaluar la funcionalidad del diseño final de forma física antes de entrar en el proceso de producción masiva.
- Debido a que las partes pueden ser imprimidas directamente, es posible producir objetos con un gran nivel de detalle e intrincación.
- Si se utilizan los materiales adecuados, es un método sostenible y amigable con el medio ambiente.
- Posibilita pequeñas producciones o tiradas de un modelo o de una pieza específica que posea ciertas particularidades.

3.1.1. La impresión 3D

La impresión 3D, considerada por la comunidad científica como una tecnología disruptiva, es la opción más reciente nacida dentro del paradigma del RP. A día de hoy, el prototipado rápido es sin duda la aplicación más importante de la impresión 3D, usándose extensivamente en las primeras etapas del proceso de fabricación. Siguiendo con la evolución que ha experimentado recientemente el RP, la impresión 3D también ya se aplica en el producto final. La tabla 3.1 muestra los beneficios que ofrece comparado con los métodos tradicionales de manufactura.

Part/Tool	FDM	Alternative Method
End of arm robot	\$600; 24 hours	\$10000; 4 weeks
Automated turntable	\$8800; 2 weeks	\$50000; 8 weeks
Steel plates	\$20; 2 hours	\$200; 2 weeks

Tabla 3.1: Ventajas de la impresión 3D. Fuente: [48].

A través de la impresión 3D, como todo proceso de manufactura aditiva, la producción de piezas se realiza capa a capa, a escalas inferiores al milímetro. El punto de partida

siempre es un modelo digital que puede ser creado usando cualquier herramienta de software CAD para producir modelos en tres dimensiones. Durante este proceso el modelo se descompone en capas y se convierte a un fichero que leerá la impresora, la cual a su vez procesará el material por estratos de acuerdo al diseño.

Aunque existen diferentes procedimientos de impresión: stereolitografía, DLP (*Digital Light Processing*), sintetizado por láser, inyección de material, SDL (*Selective Deposition Lamination*) o EBM (*Electron Beam Melting*), el más típicamente asociado a esta tecnología es la extrusión de material termoplástico. El nombre más popular para este proceso es FDM (*Fused Deposition Modelling*), nombre registrado por Stratasys, la compañía que lo patentó. Sin embargo, a raíz de la emergencia del proyecto *Repap*, este procedimiento se empezó a denominar *Fused Filament Fabrication* (FFF). Dicho proyecto, surgido a principios de los años 2000 y popularizado sobre todo a partir del año 2012, propone el desarrollo de impresoras 3D de código abierto y auto-replicas, como son las empleadas en este proyecto. Un ejemplo de este tipo de impresoras se puede ver en la figura 3.1.

Las impresoras FFF trabajan derritiendo hasta el punto de fusión un filamento de termoplástico que es depositado capa por capa, por medio de un cabezal caliente (extrusor), en una plataforma incorporada a la impresora, comenzando a crear la forma predeterminada de acuerdo a los datos suministrados a la impresora. Cada capa se va enfriando y endureciendo durante el proceso de deposición, pegándose al mismo tiempo al estrato anterior. Una vez acabada esa capa, el extrusor se desplaza verticalmente hacia arriba para comenzar la siguiente iteración. Una vez extraída de la impresora, la pieza frecuentemente necesita ser sometida a ciertas operaciones de acabado (desbastado, aplicación de pintura, lacado, ...). Con este proceso se pueden conseguir piezas con buenos terminados y gran nivel de detalle.

Dependiendo de la tecnología de impresión, es posible utilizar diferentes materiales, incluyendo materiales metálicos y cerámicos. Sin embargo, a nivel básico, las opciones son más limitadas siendo actualmente el plástico, normalmente ABS o PLA, el material más utilizado y el que se ha empleado para desarrollar los prototipos de este trabajo. El ABS (*Acrylonitrile Butadiene Styrene*) es posiblemente el más comúnmente utilizado en el nivel de iniciación dentro del FFF. Es particularmente resistente y se fabrica en una amplia gama de colores. Se puede adquirir en forma de filamento de un gran número de suministradores no propietarios, lo cual es una de las razones de su popularidad. El PLA (*Polylactic Acid*) es un plástico biodegradable que está ganado bastantes adeptos precisamente por esta razón. Puede ser utilizado tanto en su formato en resina para procesos DLP/SL como en filamentos para FFF. También se distribuye en una gran

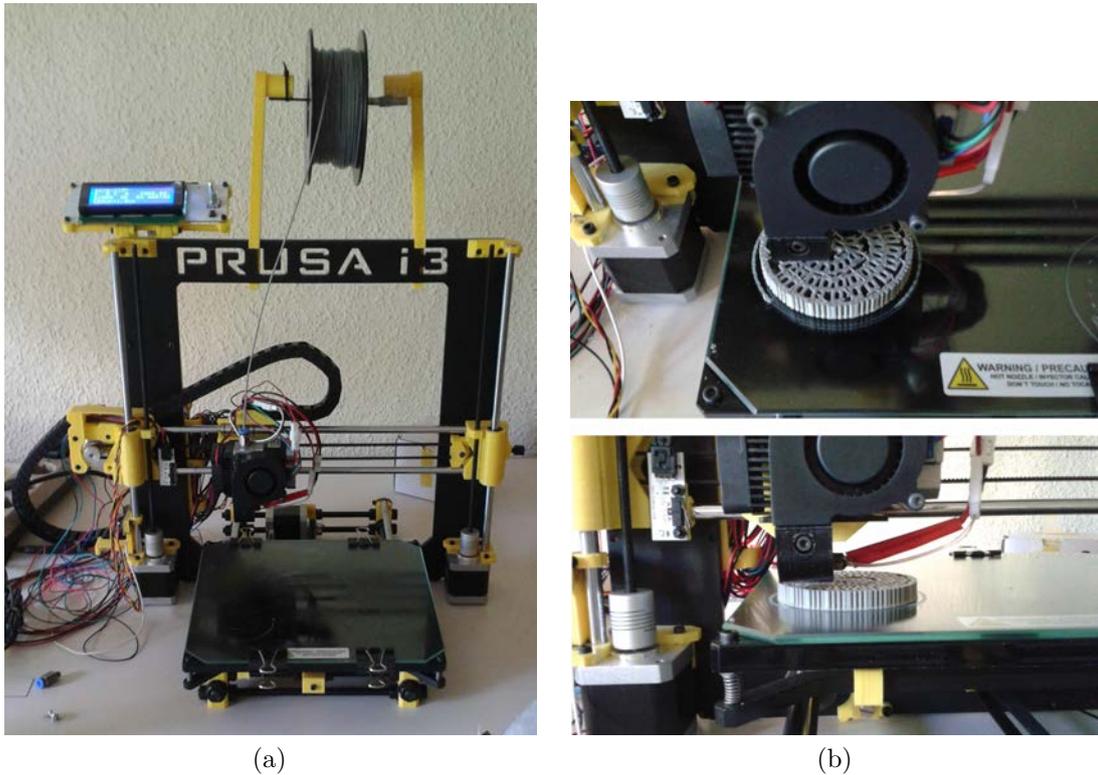


Figura 3.1: (a) Impresora cartesiana Prusa i3 Hephestos. Ofrece una resolución máxima de $60 \mu\text{m}$ y una velocidad máxima recomendada de 80 mm/s . (b) Prusa i3 Hephestos imprimiendo una pieza.

variedad de colores, incluyendo color transparente. No es tan duradero ni tan flexible como el ABS y comienza a fundir antes (unos 180°C frente a los 220°C del ABS).

3.1.2. Aplicaciones de la impresión 3D para la construcción de transductores

Como ya se señaló en el primer capítulo, debido al alto coste de manufactura es muy poco habitual que, paralelamente a los estudios teóricos, se presente un prototipo de array físico que permita realizar sobre él una validación experimental. La literatura sobre la construcción de transductores de ultrasonidos de bajo coste es escasa y, aún más, si se trata de arrays de transductores. En ocasiones, proyectos para la construcción de este tipo de dispositivos son abandonados precisamente por las dificultades de manufactura con las que se encuentran sus autores. Un ejemplo muy gráfico de ello es el proyecto *Ultra-Low-*

Cost Ultrasound Project [49], emprendido a finales de los 90 para fabricar un transductor de bajo coste destinado a ser utilizado en el tercer mundo y abandonado poco después debido a las dificultades mencionadas. En ese tiempo las tecnologías necesarias aún no estaban suficientemente desarrolladas para poder aplicar la filosofía del prototipado rápido de forma flexible y económica.

Las progresivas mejoras en la tecnología 3D han provocado que se comience a utilizar en la construcción de forma económica de dispositivos con altos requisitos tecnológicos. Prototipos de sensores de fuerza miniaturizados o piezas de plástico eléctricamente conductivas de bajo coste son algunos ejemplos [50]. La cerámica fue uno de los primeros materiales que se contemplaron para utilizarlo en la impresión 3D y es lo que ha permitido que esta técnica se adentre en el mundo de la construcción de transductores. GE Global Research, en el año 2011, reconociendo la dificultad de la manufactura a la hora de dar forma y mecanizar piezas cerámicas para nuevos diseños de transductores de formas complejas, comenzó a aplicar la impresión 3D para desarrollar sus elementos activos. Inmediatamente pudieron comprobar su potencial para aplicarlos en imagen médica y comenzaron a construir transductores para equipos de ultrasonidos portátiles usando la manufactura aditiva.

En los últimos años, se han seguido publicado estudios en los que se utiliza la AM en el mismo sentido, consiguiendo transductores ultrasónicos con altos coeficiente piezoeléctricos. Por ejemplo, en [47] recurren a la impresión 3D para fabricar estructuras complejas de epoxi, en forma de panel, para alojar barras piezoeléctricas separadas por oquedades de aire. En [46], con el objetivo de simplificar los procesos de moldeo y mecanizado, utilizan la tecnología de estereolitografía con nanopartículas para fabricar un transductor de 6,28 MHz. Con este técnica, se logra imprimir con cerámica PZT múltiples geometrías, configuraciones y estructuras diferentes. El proceso aditivo logra producir tanto elementos individuales como composites de diferentes conectividades y son validados para construcción y optimización de prototipos y para pequeñas producciones, concluyendo que este proceso posibilita la fabricación de arrays piezoeléctricos de geometría compleja con un incremento en la efectividad de conversión de energía y brindando grandes posibilidades para construir transductores focalizados de alta intensidad.

Los sistemas de impresión 3D parecen, por tanto, tener un gran futuro en aplicaciones de sintetizado de los elementos de los arrays ultrasónicos. No obstante, normalmente los equipos utilizados son caros y complejos. Como se muestra en este trabajo, la tecnología de impresión 3D se puede extender a la construcción de otras partes del transductor. En este caso, con una impresora 3D de bajo coste y código abierto, es posible implementar la estructura sobre la que irán alojados todos los componentes del dispositivo.

3.2. PROCEDIMIENTO DE FABRICACIÓN

En el primer capítulo se describieron los procedimientos clásicos que se adoptan para fabricar arrays de transductores. Aunque nuestra metodología es muy diferente, dadas las premisas de las que hemos partido, tomando como base aquellos procedimientos es posible identificar las etapas de construcción que tendrá nuestro modelo de desarrollo. El esquema de montaje propuesto para implementar el procedimiento de fabricación se muestra en la figura 3.2:

Como se puede observar, nuestro modelo parte de la implementación del cuerpo del transductor, formado por dos piezas cilíndricas que encajan entre sí y que componen la estructura del transductor. Sirven de soporte a todos los elementos del dispositivo: sensores piezoeléctricos, cableado eléctrico, contramasa y capa de adaptación. Dicha estructura está concebida dentro de la filosofía del prototipado rápido y ha sido diseñada e impresa con tecnología de impresión 3D. El material utilizado es el PLA.

En el desarrollo de este modelo se plantean una serie de retos que deben ser afrontados en su implementación práctica y que se enumeran a continuación:

- El procedimiento está concebido como un montaje estructurado en capas. Cada elemento del dispositivo va montado uno sobre el otro y es importante tener en cuenta las interacciones electromecánicas que se puedan producir entre ellos.
- Los elementos del array son pilares individuales y están dispuestos según geometrías más o menos complejas. El diseño de la primera estructura debe permitir su posicionamiento sin dificultad y de forma flexible de tal manera que sea posible adaptarlo a diferentes geometrías.
- El posicionamiento del cableado y de su conexión con los elementos del array es un punto crítico en el proceso. El diseño de la estructura debe proporcionar acceso eléctrico por medio de cables a cada uno de los elementos evitando interferencias entre ellos y entre cada pareja de cable y elemento. Se deben mantener bien diferenciados los planos eléctricos de masa y de excitación de los elementos.
- La estructura que contiene la capa de backing debe dividir a esta capa en columnas de forma que cada una de ellas se posicione individualmente por encima de cada elemento del array. Debe poder acoplarse perfectamente con la estructura inferior. Proporcionará una salida del cableado por la parte superior del transductor.

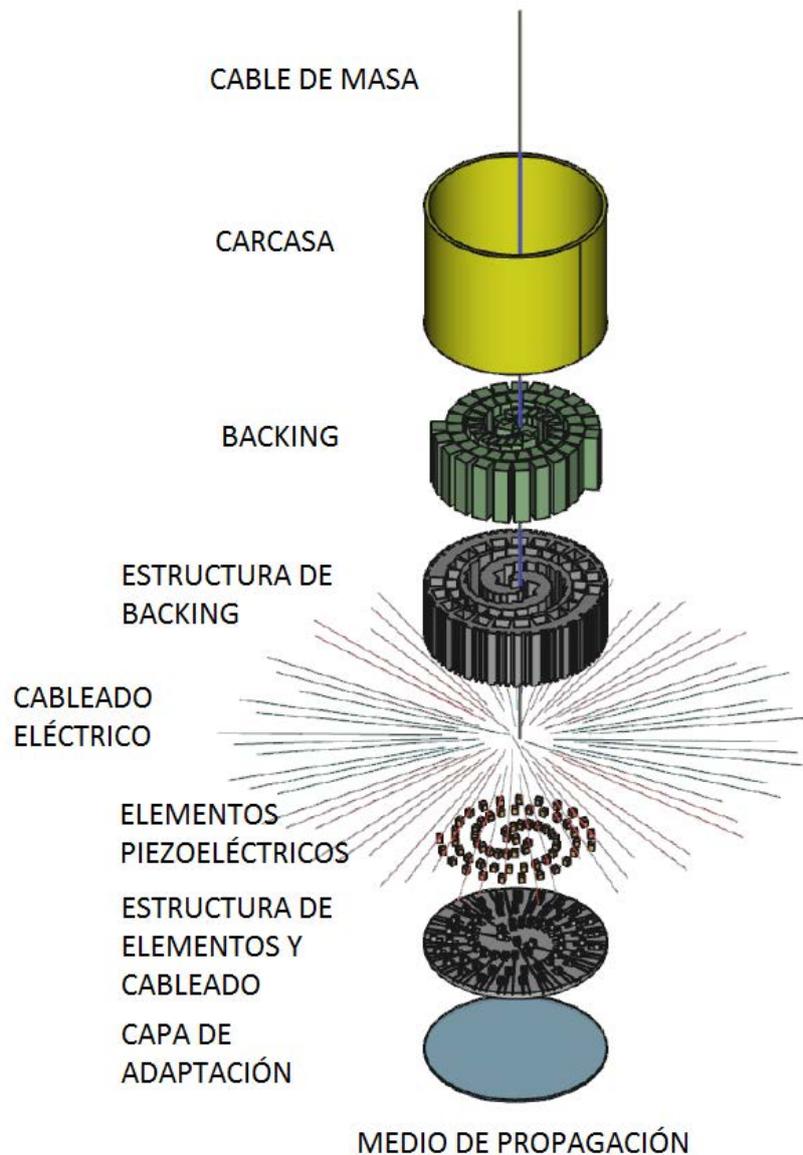


Figura 3.2: Despiece de un prototipo en espiral de Fermat de 64 elementos.

- El diseño debe permitir incluir una carcasa para la manipulación del dispositivo y su protección mecánica y eléctrica, sin interferir en el buen funcionamiento del resto de los elementos.
- También se facilitará el añadido de una capa de adaptación como último paso del proceso de fabricación.

Para llevar a cabo la exposición de nuestro procedimiento, dividiremos el resto del apartado en cuatro partes:

- Corte de la cerámica piezoeléctrica para la obtención de los elementos del array.
- Diseño y construcción de la estructura para la distribución de los elementos y el conexionado.
- Diseño y construcción de la estructura contenedora de la capa de backing. Fabricación de dicha capa.
- Fabricación de la capa de adaptación.

3.2.1. Obtención de los elementos del array

El primer paso para la fabricación del prototipo es obtener los elementos activos que componen el array. Para ello, se utilizará un procedimiento distinto a los clásicos explicados en el capítulo anterior. Para nuestro prototipo, los elementos se extraen a partir del corte mediante máquina CNC de una cerámica piezoeléctrica de mayor tamaño, ya sea en forma de disco, placa cuadrada o barra. Con ello obtenemos cada uno de los elementos individuales que conforman el array con la ventaja de que no hay pérdida de material, a diferencia de los métodos habituales. Estos elementos se insertarán posteriormente en la estructura del transductor.

El espesor de la cerámica es la propiedad que rige una de las características principales de un transductor, su frecuencia de resonancia fr . Partiendo de la constante de frecuencia N y de la velocidad del sonido c en el material piezoeléctrico, proporcionados por el fabricante, se deduce que el espesor Th de las piezas sobre las que se realizarán el corte debe ser de 2 mm si se desea que la frecuencia de trabajo sea de aproximadamente 1 MHz:

$$N = \frac{c}{2} = fr \times Th \Rightarrow \frac{3900}{2} = fr \times 0,002 \Rightarrow fr = \frac{1950}{0,002} = 975 \text{ kHz} \quad (3.1)$$

Los elementos del array son pilares de tamaño $(1,5 \times 1,5 \times 2) \text{ mm}^3$. Dado el diámetro de la apertura activa (unos 45 mm), dicho tamaño es adecuado para mantener la mayor superficie emisora posible. Además, supone unas dimensiones que facilitan el proceso de corte en la máquina disponible en el taller de mecanizado del ITEFI-CSIC y su manipulación a la hora de construir el array.

El material utilizado es cerámica tipo PZT-5A. Posee alto coeficiente de acoplamiento electromecánico, alta temperatura de Curie, alta resistividad y constante dieléctrica

moderada lo que, según el fabricante, le hace indicada tanto para sistemas de imagen médica como para ensayos no destructivos. El Apéndice 2 contiene un listado de las propiedades mecánicas y eléctricas del material Pz27 (PZT-5A) de Ferroperm.

La figura 3.3 muestra la apariencia de los elementos que componen los arrays de los prototipos construidos en este trabajo.

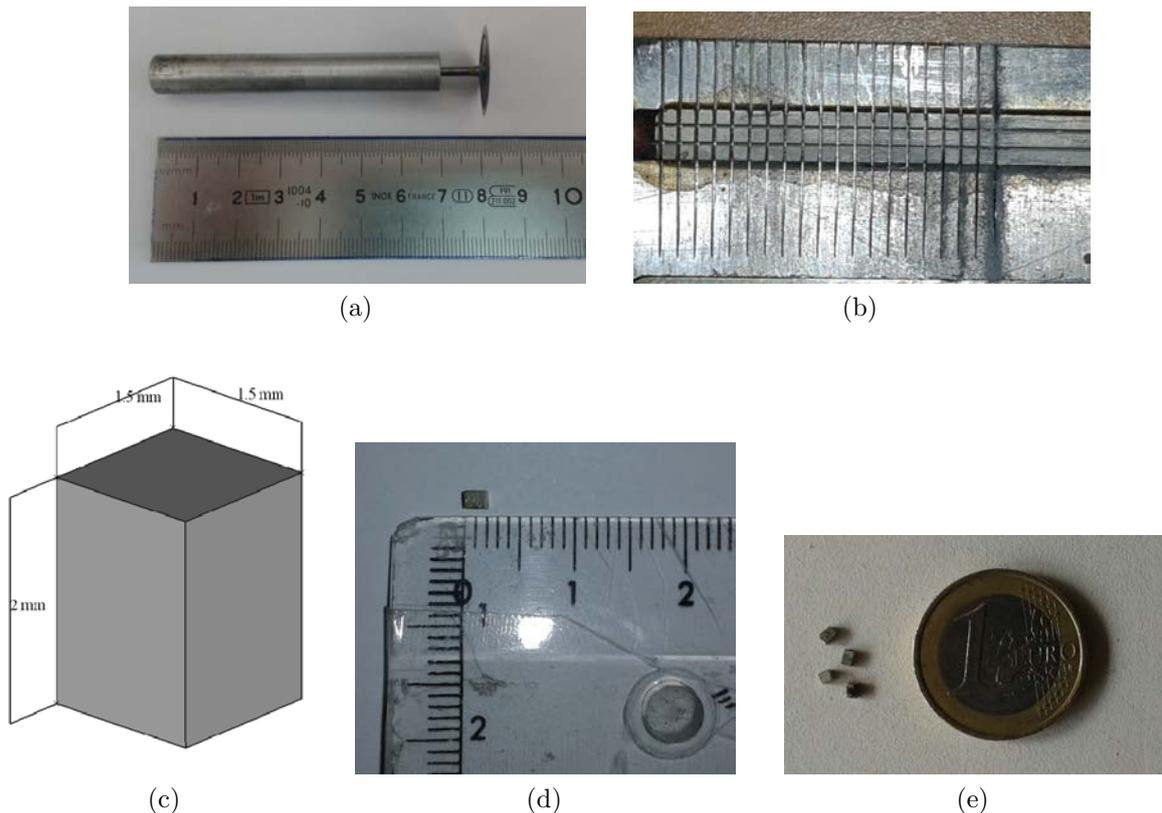


Figura 3.3: (a) Fresa de disco CNC. (b) Barra de cerámica tipo PZT-5A cortada. (c) Representación axonométrica de un pilar piezoeléctrico $((1,5 \times 1,5 \times 2) \text{ mm}^3)$. (d) y (e) Imágenes en las que se puede apreciar el tamaño real de los elementos.

Las particulares dimensiones de los pilares constituye una de las principales limitaciones de este proyecto y su influencia se revelará en algunos de los resultados obtenidos. Las piezas cerámicas de las que se extraen tienen la propiedad geométrica de tener un diámetro superior a 10 veces su grosor, lo que indica que es el espesor la dimensión lineal que gobierna su resonancia y por ello se dice que vibran en modo espesor o modo *thickness*. Sin embargo, los pilares obtenidos en el proceso de corte son de una forma prismática que dejan de cumplir las características dimensionales propias de ese modo. Tampoco se les puede aplicar la vibración tipo barra longitudinal, geometría indicada

para la fabricación de arrays 2D [6], ya que la restricción dimensional de este modo es que la longitud sea superior a 2,5 veces su diámetro. Como conclusión, las dimensiones de los elementos obtenidos en nuestro proceso, a pesar de ser adecuadas para la inserción en su estructura, vibrarán de forma alejada a un modo espesor 'puro' lo que dará lugar a la aparición de resonancias en modos radiales o planares.

El empleo de piezocomposites, de mayor coste, deberían paliar estas dificultades haciendo mucho más eficiente la vibración en modo espesor. Sin embargo, siguiendo la filosofía de este proyecto, para lograr el menor impacto económico posible se ha optado por la cerámicas convencionales para la fabricación de los primeros prototipos.

3.2.2. Distribución de los elementos del array y del conexionado eléctrico

Comenzando por la parte inferior del esquema del montaje general mostrado en la figura 3.2, la primera pieza de la estructura es un disco de unos 57 mm de diámetro, algo mayor al de la apertura acústica que aloja. Su espesor es igual o ligeramente superior al de los elementos. Tiene dos funciones fundamentales: distribuir los pilares cerámicos del array según la geometría seleccionada y procurar a los cables de la señal una vía hacia los elementos. Esta pieza es el elemento base del transductor y el primero que debe ser concebido; de su correcto diseño depende en gran parte el buen desempeño del dispositivo. Debe contener una serie de elementos y cumplir una serie de condiciones que se enumeran a continuación:

- Los huecos en los que van insertados los pilares deben seguir la geometría escogida en el modelo teórico. Puesto que los elementos no se pueden tocar entre sí, estos agujeros no pueden ser comunicantes. Como se explicará más adelante, y aunque depende del método de inserción, es conveniente que haya cierta holgura entre hueco y elemento.
- Los canales para dar salida a los cables deben poder disponerse de forma flexible y adaptable a otras geometrías. No deben interferir en la trayectoria de los elementos ni en la de otros cables. No deben sobresalir por la superficie del disco, por ello irán embutidos dentro de la estructura. Pueden ser trazados por la cara inferior para impedir contacto eléctrico entre cables por derrame de una capa de backing conductora.
- Recordemos que, para evitar influencias del cable sobre el elemento, ambos no se pueden tocar. Esto implica que el sistema de conexión requiere de un cuidado

diseño. Existen varias soluciones que se verán más adelante, pero todas ellas deben lograr que el cable quede amarrado muy próximo al elemento sin tocarlo y aproximadamente a su altura.

- El disco debe poder ajustarse con la pieza superior, evitando holguras, por lo que ni elementos, ni cables ni sistema de conexión deberían interferir en el acople.
- Tiene que proporcionar una salida al cableado de masa, bien a través de canales en su periferia o a través de un agujero central.
- El reverso de la pieza debe tener una superficie suficientemente plana de modo que todos los elementos queden en el mismo plano de radiación.
- Es conveniente que sus bordes contengan hendiduras para dejar cierta holgura al cableado, evitando pelados o roturas por roce con la carcasa.

Dadas las condiciones que tiene que cumplir, el diseño de esta pieza no es trivial. Hay que tener en cuenta, además, las limitaciones de resolución que tiene una impresora 3D de bajo coste y su forma de trabajar, capa por capa, lo que obliga a que el modelo tenga una base plana y firme en su parte inferior y sin partes salientes. Hasta llegar a los diseños finales se realizaron múltiples variaciones buscando su optimización. En la figura 3.4 se expone algunas de estas aperturas impresas en las primeras etapas de este trabajo; se observa cómo han ido evolucionado las distintas soluciones.

La figura 3.5 muestra un diseño CAD que cumple con todos los requisitos de construcción. Mantiene el cableado por la parte superior, los huecos tienen suficiente holgura y su sistema de conexión es por enganche del cable con saliente.

Una vez obtenido el molde de la estructura por impresión 3D se puede proceder a la construcción de esta fase del transductor siguiendo el siguiente procedimiento general:

- Paso 1: acabado de la pieza; figura 3.6. Como ocurre en la mayoría de las piezas obtenidas por manufactura aditiva, primeramente es necesario efectuar un rematado de la pieza para que los huecos y canales de la estructura queden más limpios de hilos y rebabas.
- Paso 2: inserción de los elementos; figura 3.7. Con la estructura apoyada en papel adhesivo, se introducen los elementos en los huecos. Sobre cada uno de ellos se aplica cuidadosamente una gota de adhesivo de baja viscosidad (Loctite 480 o 495) con una jeringuilla o cánula procurando aplicarla en la holgura entre hueco y elemento. Con ello fijaremos la cerámica a la estructura y aislaremos sus dos

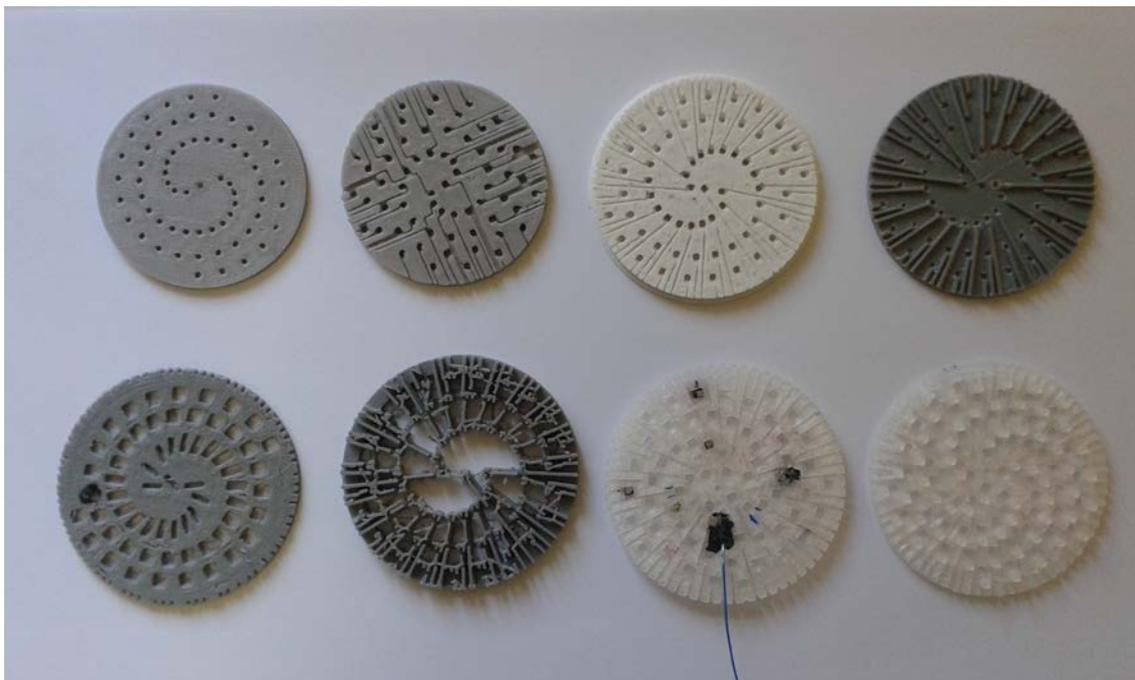


Figura 3.4: Diferentes diseños de la estructura de elementos y cableado.

electrodos para impedir el contacto eléctrico entre ellos. También es posible diseñar la estructura sin holgura en los huecos con lo que los elementos se introducen por presión, sin embargo el primer método es el de nuestra elección al ser menos agresivo para la cerámica ya que evita roces y fragmentaciones durante su inserción. Una vez insertados todos los elementos, se limpia su superficie de los posibles restos de pegamento que hayan podido quedar. Los elementos deben quedar con su electrodo común contenido en el mismo plano de radiación.

- Paso 3: posicionamiento del cableado y conexiones; figura 3.8. A continuación, se fija cada cable en su canal correspondiente y se engancha según sistema de conexión. Se probaron varios sistemas: con el cable sujeto a la estructura haciendo gancho, por medio de un ojal atravesando la estructura o amarrado a un saliente vertical. Este último método es el más adecuado por ser el más cómodo y el que fija el cable de forma más segura. La conexión se puede terminar enrollando el cable alrededor del saliente (figuras 3.10c, 3.10d, 3.8c y 3.8d) o embutiéndolo por medio de calor (figuras 3.8e y 3.8f), sistema finalmente escogido porque aporta mayor rapidez y facilidad a la hora de aplicar el metalizado. Una vez colocado todo el cableado, es posible rellenar los canales de los cables con algún tipo de material plástico moldeable para terminar de afianzar los cables y evitar que se llenen de

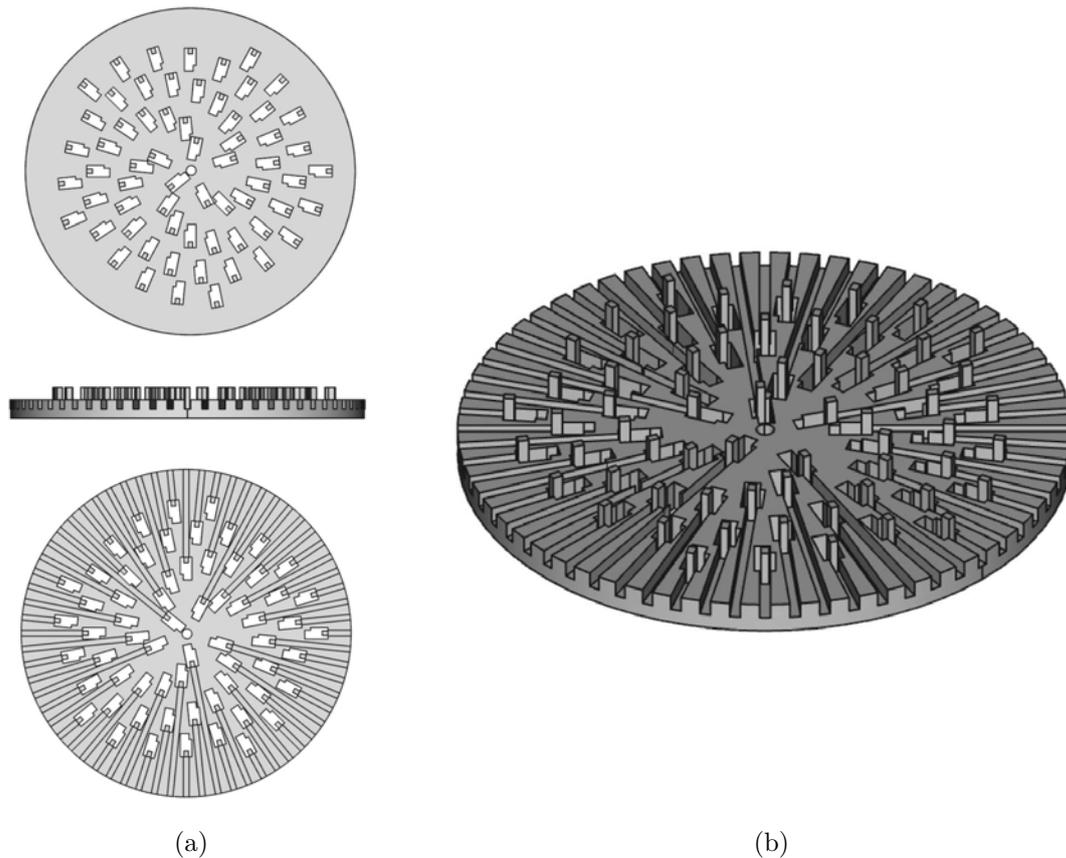


Figura 3.5: Modelo CAD de la estructura de elementos y cableado; (a) planta, alzado y planta inferior, (b) perspectiva axonométrica.

material de backing durante su fabricación. Finalmente, se etiqueta cada cable para su identificación.

- Paso 4: cierre del contacto eléctrico y metalizado del electrodo; figura 3.8. Para completar el trazado eléctrico entre elemento y cable, se aplica una capa de pintura de plata conductiva del menor espesor posible. Esto también se puede realizar antes del paso 3, cubriendo totalmente la apertura de plata conductiva y limando posteriormente el remanente de pintura de forma que queden los elementos aislados; a continuación, se procedería a la colocación del cableado. En las primeras etapas de este trabajo se contempló aplicar una fina capa de adhesivo sobre los elementos para asegurar su aislamiento y proteger la plata de posibles corrupciones en el medio. Sin embargo, esta idea fue desechada para evitar tener una interfase de material entre elemento y capa de backing. Algunos autores confirman la idoneidad de prescindir de esa capa [51].

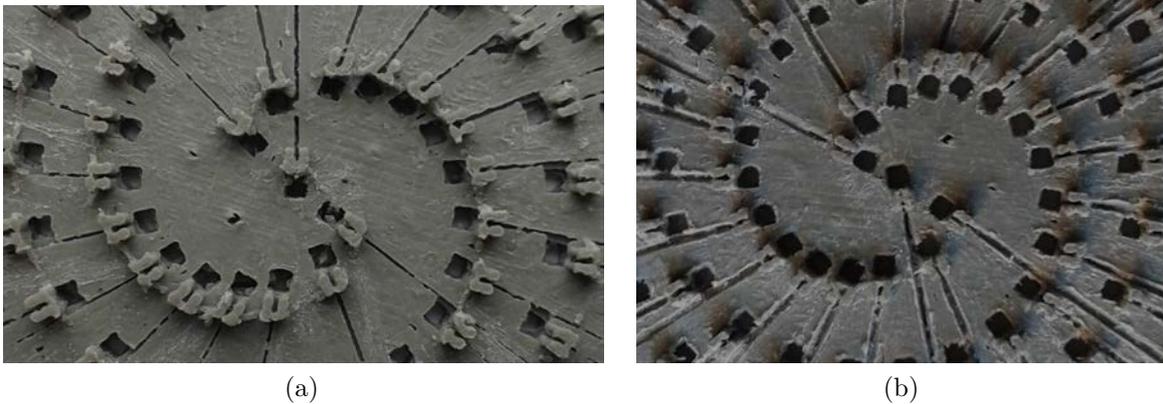


Figura 3.6: (a) Pieza recién impresa; (b) Pieza con acabado, se aprecia que los huecos para elementos y cables están libres de restos de plástico procedentes del proceso de impresión.

- Paso 5: implementación del electrodo de masa; figura 3.9. El reverso del disco se pinta en su totalidad de plata conductiva para poner en contacto el electrodo común de todos los elementos. Según la solución escogida en el diseño, para sacar el cableado de masa al exterior se puede hacer embutiendo dos o tres cables de sección $0,25 \text{ mm}^2$ en la parte frontal del transductor y guiándolos hacia el exterior por la periferia de la estructura o sacando un cable de mayor sección ($0,75 \text{ mm}^2$) por la parte central. Se recomienda elegir el segundo método por ser el más practicable.

En la figura 3.10 se muestran imágenes de esta estructura finalizada perteneciente a cuatro prototipos diferentes. En el de abajo a la derecha (3.10d) se utilizaron todos los métodos elegidos por lo que representa la mejor solución.

3.2.3. Fabricación de la capa de backing

3.2.3.1. Posicionamiento del backing

Sobre la estructura descrita en el apartado anterior se posiciona el cilindro de mayor altura el cual tiene 2 funciones: alojar en su interior la capa de backing y conducir el cableado eléctrico hacia el exterior. Tiene el mismo diseño geométrico que el disco inferior de tal modo que cada columna de material de respaldo esté situada justo encima de cada elemento del array de forma independiente, para que puedan ser excitados por separado sin interacción eléctrica con los elementos adyacentes. Este es un factor de diseño esencial ya que dependiendo de la la composición del backing, puede llegar a hacerlo conductivo a

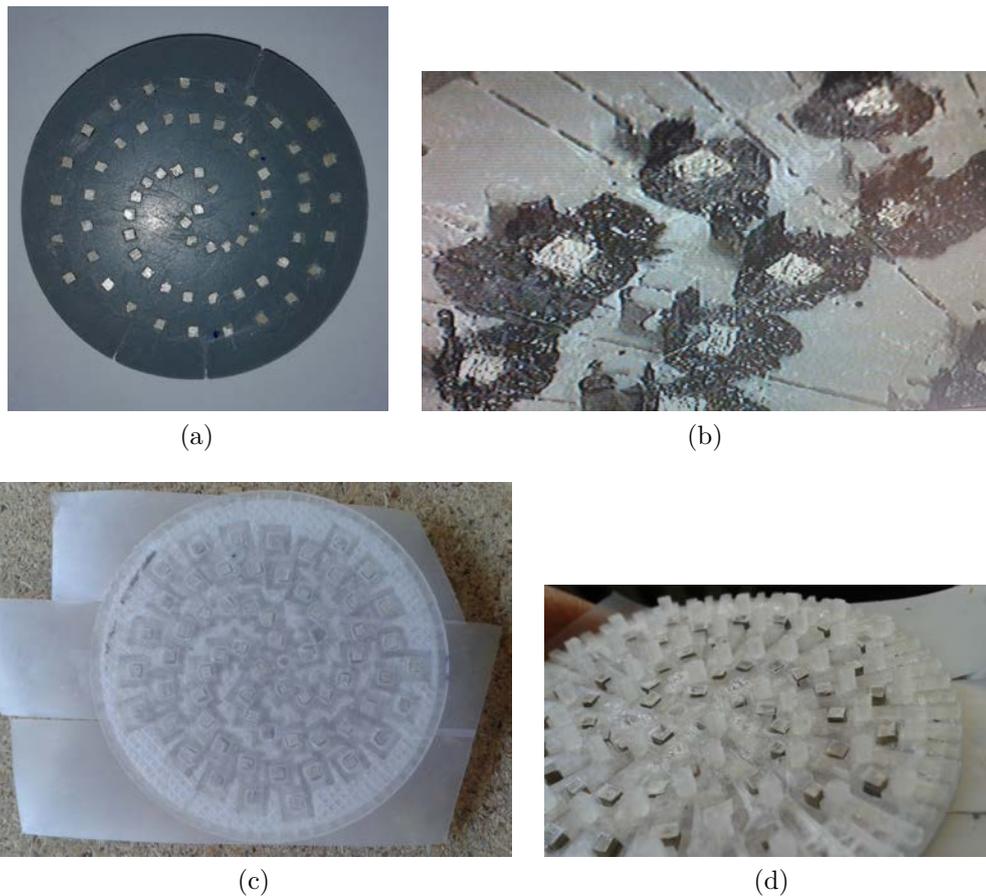


Figura 3.7: Inserción de elementos: por presión, (a) cara inferior, (b) detalle de la cara superior, las zonas de color negro son restos de adhesivo usado para la sujeción de elementos y el aislamiento entre sus electrodos (imagen ampliada); con holgura, el método más apropiado, (c) cara inferior, (d) detalle de la cara superior; se observa pequeños fragmentos de papel adhesivo para mantener la cerámica lo más limpia posible de pegamento.

determinadas proporciones. No obstante, siempre que se asegure que la capa de backing no es conductora, algunos huecos de la espiral pueden estar comunicados para facilitar el vertido de la mezcla. El perímetro de la estructura lleva incorporado acanaladuras para dirigir al cableado hacia el exterior de tal modo que su acceso se produzca por la parte superior del transductor. También puede llevar canales en su base que ayuden a guiar los cables hacia el perímetro. El cable o cables de masa pueden salir por el hueco central o por canales de la periferia. La altura del molde se calcula para que pueda contener la cantidad de material necesario para acortar varios ciclos de onda: 40 mm es suficiente para atenuar 10 ciclos de una señal de 1 MHz en una capa de backing de unos

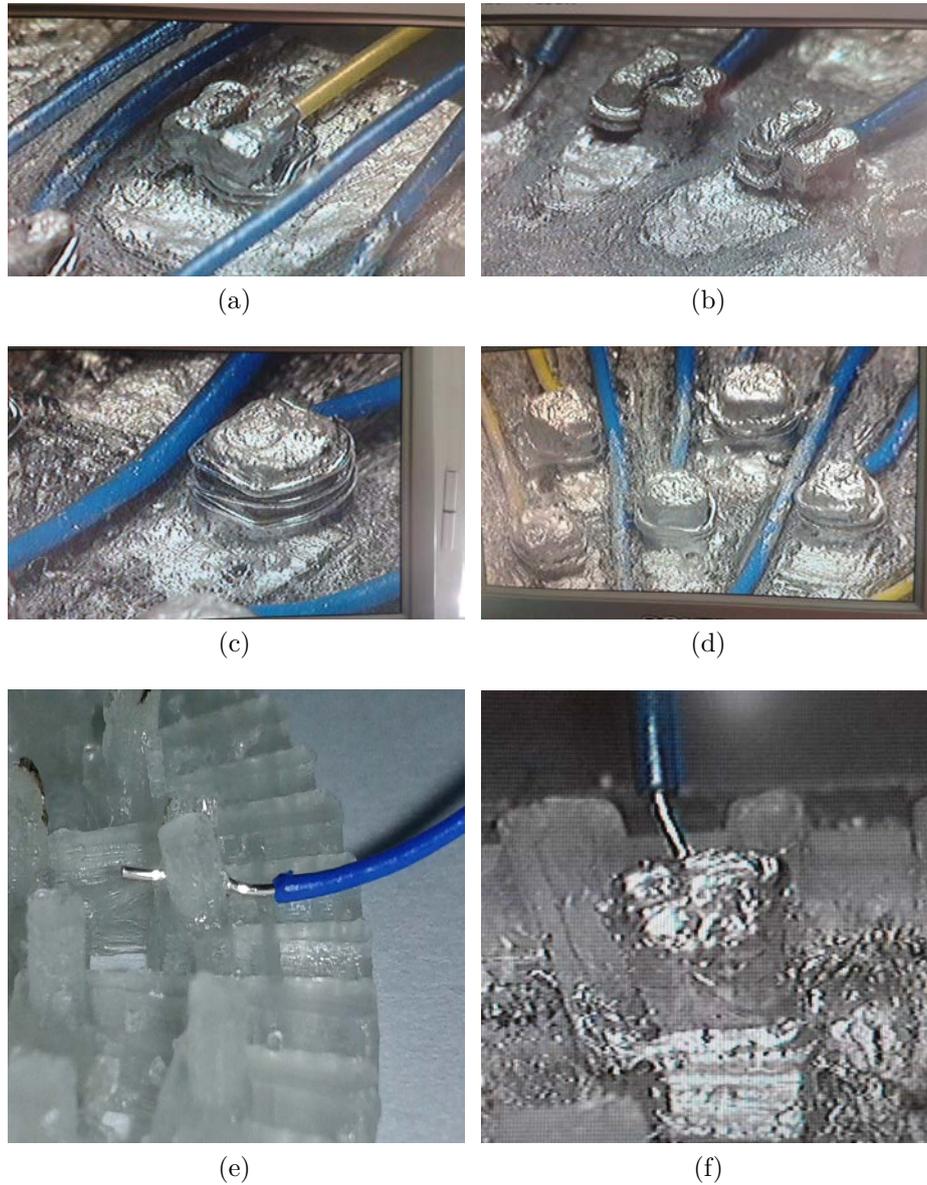


Figura 3.8: Sistemas de conexión de los cables y metalizado: (a) y (b) amarrado a saliente metalizado con ranura central (imágenes ampliadas), (c) y (d) amarrado a saliente con metalizado (imágenes ampliadas); el sistema óptimo elegido, embutido con calor a saliente: (e) sin metalizar, (f) metalizado (imagen ampliada).

3000-3500 m/s como típica máxima velocidad de propagación [52–55]. A diferencia del disco descrito en el apartado anterior, esta estructura permite menos variación debido a sus restricciones de diseño. La imagen 3.11 representa un diseño CAD que cumple con los requisitos anteriores.

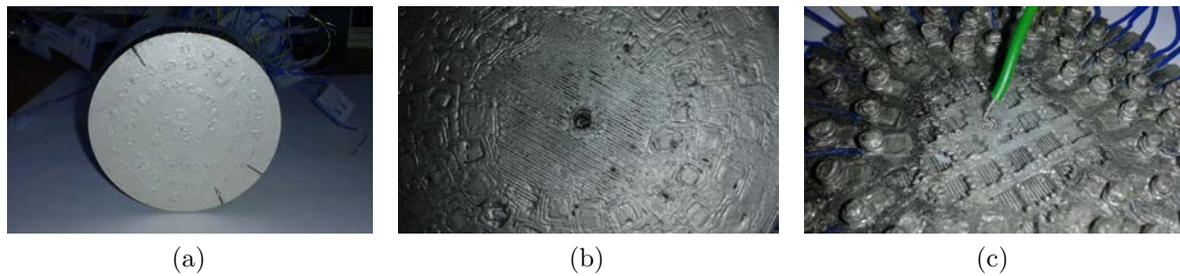


Figura 3.9: Inserción del cableado de masa; (a) a través de los laterales, (b) y (c) por el centro.

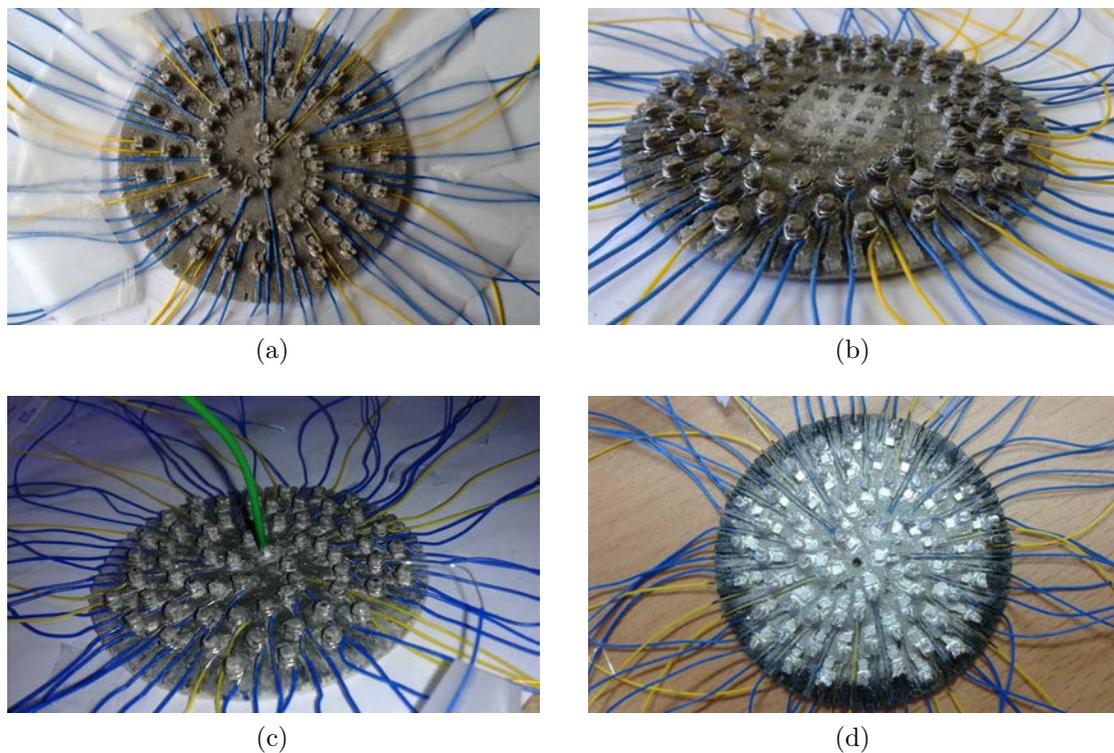


Figura 3.10: Estructura de elementos y cableado finalizada: (a), (b) y (c) distintas propuestas; (d) solución óptima.

Tras obtener este molde y antes de añadir la capa de respaldo, las dos piezas que componen la estructura del transductor se unen y se encapsulan dentro de una carcasa metálica (latón, aluminio, ...). Esta carcasa protege a la apertura, brindándole resistencia mecánica y contra la corrosión, facilita su manipulación y ayuda a minorar el ruido eléctrico ya que va conectada al electrodo de masa común. Es recomendable aislar la

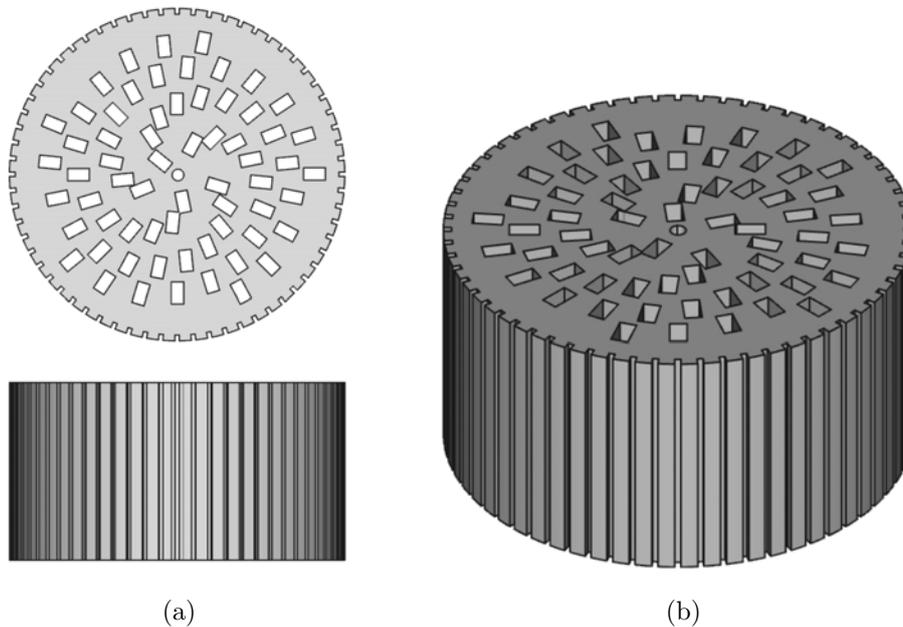


Figura 3.11: Modelo CAD de la estructura de backing: (a) planta y alzado, (b) vista axonométrica.

carcasa por dentro (por ejemplo, añadiendo una capa de adhesivo) y proteger los cables (con esparadrapo o adhesivo) contra contactos con el cilindro en caso accidental de rotura o pelado de cables durante su manipulación. En la figura 3.12 se muestra cómo queda el cableado dirigido hacia la parte superior y el montaje de la carcasa.

3.2.3.2. Sintetizado del backing

Son dos los parámetros que deben regir la fabricación de una capa de backing:

- Impedancia: su valor debe ser similar al del material piezoeléctrico. Esto es necesario para permitir que la mayor cantidad de energía mecánica sea absorbida por la parte trasera del transductor y así poder detener las oscilaciones de la cerámica de la forma más eficaz posible. Hay que tener en cuenta que cuanto mejor sea este acople energético, la señal emitida por la parte frontal será de menor amplitud y por tanto perderá sensibilidad. Por el contrario, con una menor impedancia acústica de la contramasa se logra una mayor sensibilidad aunque los pulsos transmitidos serán más largos. Este compromiso entre impedancia y sensibilidad implica elegir cuidadosamente los materiales de fabricación.

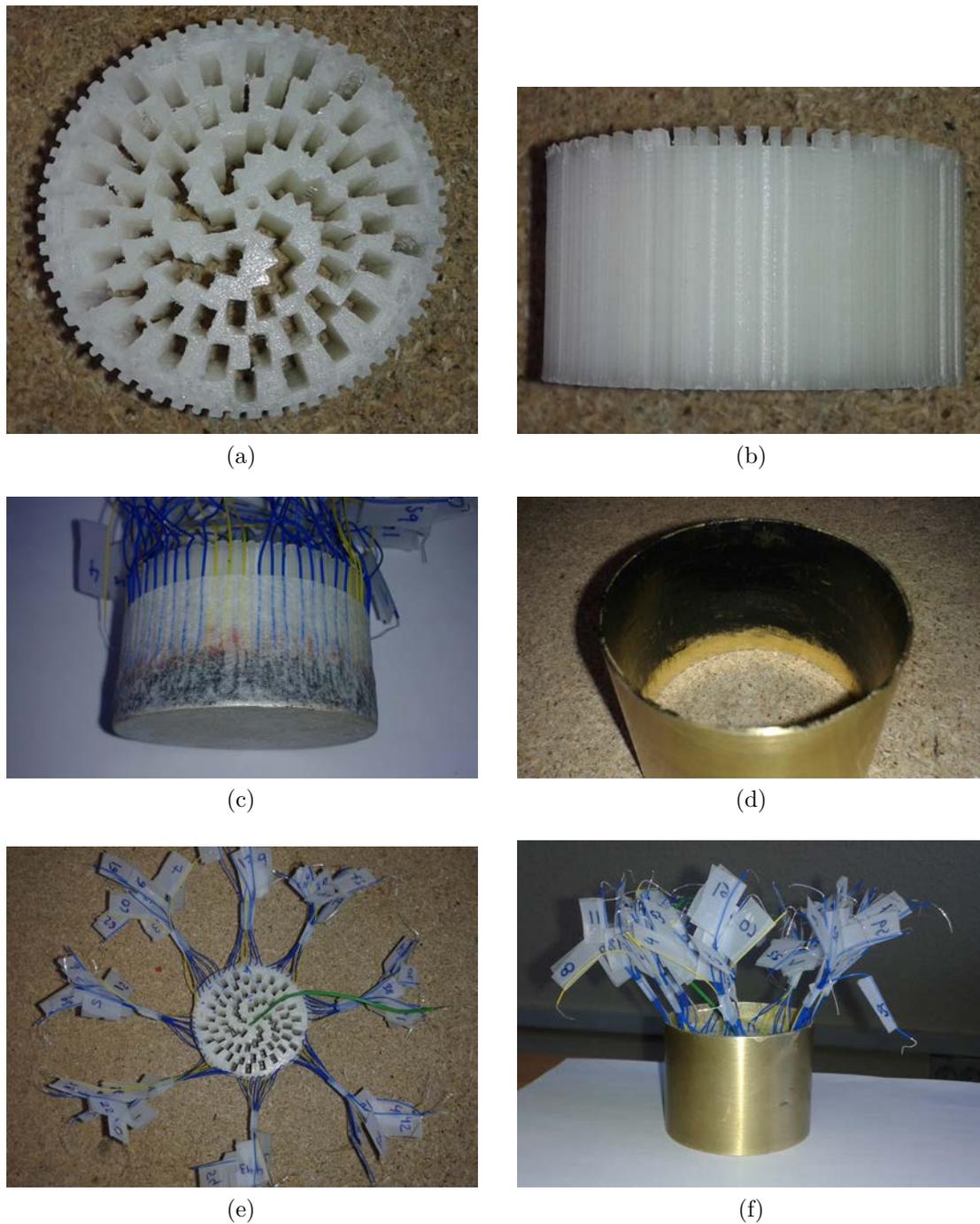


Figura 3.12: Estructura de backing: (a) planta, (b) alzado; (c) cables guiados a través de los canales de la estructura; (d) carcasa de latón con adhesivo; (e) y (f) estructura completa del transductor encapsulada.

- Atenuación: para restar la mayor cantidad posible de energía a la señal que penetra en el backing, interesa disponer de componentes absorbentes y dispersivos con el

objetivo de provocar el mayor número de rebotes de la onda de propagación en su interior.

Para el sintetizado de backing se emplean normalmente compuestos de dos fases. El componente matriz es el que generalmente aporta un mayor coeficiente de absorción [7]. El relleno o carga de alta densidad tiene la misión de elevar la impedancia de la mezcla y aportar la mayor dispersión posible aumentando la heterogeneidad del medio. Para la primera fase se suele elegir algún tipo de resina o epoxi y para la carga, el material más utilizado es el polvo de tungsteno o wolframio (W). La proporción óptima de W es objetivo de numerosos estudios [7, 52, 53, 56, 57]. Hay que partir del hecho de que la impedancia del material piezoeléctrico es alta, de alrededor de 30 MRayls, por lo que obtener una capa de backing con una impedancia cercana a ese valor implica añadir grandes proporciones de W, en torno al 0,6 en fracción de volumen [7, 53, 58]. Aún con instrumentación específica, obtener esa proporción es complicado debido a la dificultad de alcanzar ese nivel de saturación por problemas de empaquetado de las partículas. La alta viscosidad de la mezcla y la dificultad para compactar el refuerzo suficientemente complican la operación [59]. Adicionalmente, al representar gráficamente el valor de la impedancia frente a la proporción de W nos encontramos con una pendiente muy pronunciada [7] lo que dificulta la reproducibilidad y el control de las propiedades de estas mezclas. Por otro lado, cuando se baja la fracción de volumen por debajo de 0.4 nos encontramos con una ventaja al tener la seguridad de que el compuesto no es conductivo y, por tanto, adecuado para construir capas de backing en arrays [59]. La goma es otro tipo de material utilizado para el relleno con el objetivo de aumentar su poder dispersivo [60, 61]. En [60] se utiliza una fracción de volumen de partículas de goma igual a la mitad de la del W con buenos resultados en atenuación aunque a costa de una disminución de la impedancia. La pumita o piedra pómez, por su gran porosidad y buenas propiedades acústicas, puede ser otra opción para aumentar la heterogeneidad y la dispersión en el medio.

La capa de backing de los transductores de este trabajo se fabricó por estratos en los que conforme se va subiendo en altura (alejándonos de la posición de los elementos) la densidad y la impedancia van disminuyendo proporcionalmente, aumentando, por el contrario, el efecto dispersivo. Este proceso es progresivo, evitando cambios bruscos de impedancia con lo que se minoran las reflexiones de energía acústica en las interfases. En este sentido, el efecto de la gravedad colabora ya que, mientras la resina no ha curado por completo, las zonas de mayor densidad se van depositando en el fondo. Esto se puede realizar fabricando la mezcla en varias etapas diferenciadas. Como matriz se utiliza el adhesivo de dos componentes Araldite 2020 de muy baja viscosidad (150 mPa a 23°C),

temperatura ambiente de curado y alto tiempo de operación (45 minutos a 23°C) y de curado (16 horas a 23°C), propiedades que facilitan su mezclado y desgasificación. La composición del relleno es distinta en cada una de las etapas, lo que cambia las características de los estratos. Aquí se propone una capa de backing estratificada en tres fases del mismo espesor aproximado:

- El estrato inferior es la capa de alta impedancia. El relleno está compuesto por una proporción en fracción de peso de 0.8 de tungsteno en polvo (tamaño de grano $\leq 25 \mu\text{m}$ y pureza del 99,9%). El criterio es lograr una mezcla lo más saturada posible pero suficientemente fluida para facilitar su operación y que no ofrezca problemas a la hora de extraer el aire que pueda haber en su interior.
- El estrato intermedio es de menor impedancia que el anterior pero más dispersivo. Por ello, disminuye la cantidad de tungsteno (0.4) pero se añaden partículas que favorezcan la dispersión del medio, 0.1 de limadura de goma + 0.1 de pumita en polvo (tamaño de grano $\leq 145 \mu\text{m}$).
- El estrato inferior es el menos denso. Tiene el objetivo de atenuar la energía remanente provocando múltiples rebotes de la onda. Está compuesto por una proporción de 0.2 de limadura de goma.

Durante el mismo proceso de fabricación, o una vez que la capa haya curado totalmente, es posible añadir otros estratos con mayor proporción de material dispersivo (goma, pumita, partículas de madera, ...) con el objetivo de conseguir una atenuación completa de la onda.

Las mezclas se introducen con una jeringuilla o cánula a través de la estructura de PLA hasta que la desborden, de manera que el material quede atrapado dentro de los límites de la carcasa. A continuación, es necesario desgasificar la mezcla en campana de vacío para eliminar las burbujas de aire atrapadas en su interior. El calor favorece el curado rápido de la resina con lo que este proceso puede durar de 2 a 5 horas, dependiendo de la temperatura exterior ¹. El dispositivo se extrae de la cámara de vacío en el momento en que se estime que la mayor parte de aire ha sido extraído pero la mezcla aún mantenga suficiente fluidez para poder ser sometida a continuación a una presión estática de unas 8 atm. a temperatura ambiente durante todo el tiempo de curado (24 horas aproximadamente). Con ello, se logra aumentar la compacidad de la muestra y evitar la formación de cavidades durante su secado. En la figura 3.14 se muestran algunas imágenes del proceso de fabricación de backing y en la figura 3.13b, dicha capa finalizada.

¹Por otra parte, la temperatura de curado, podría tener influencia relevante en la atenuación final e impedancia, [54, 59, 61].

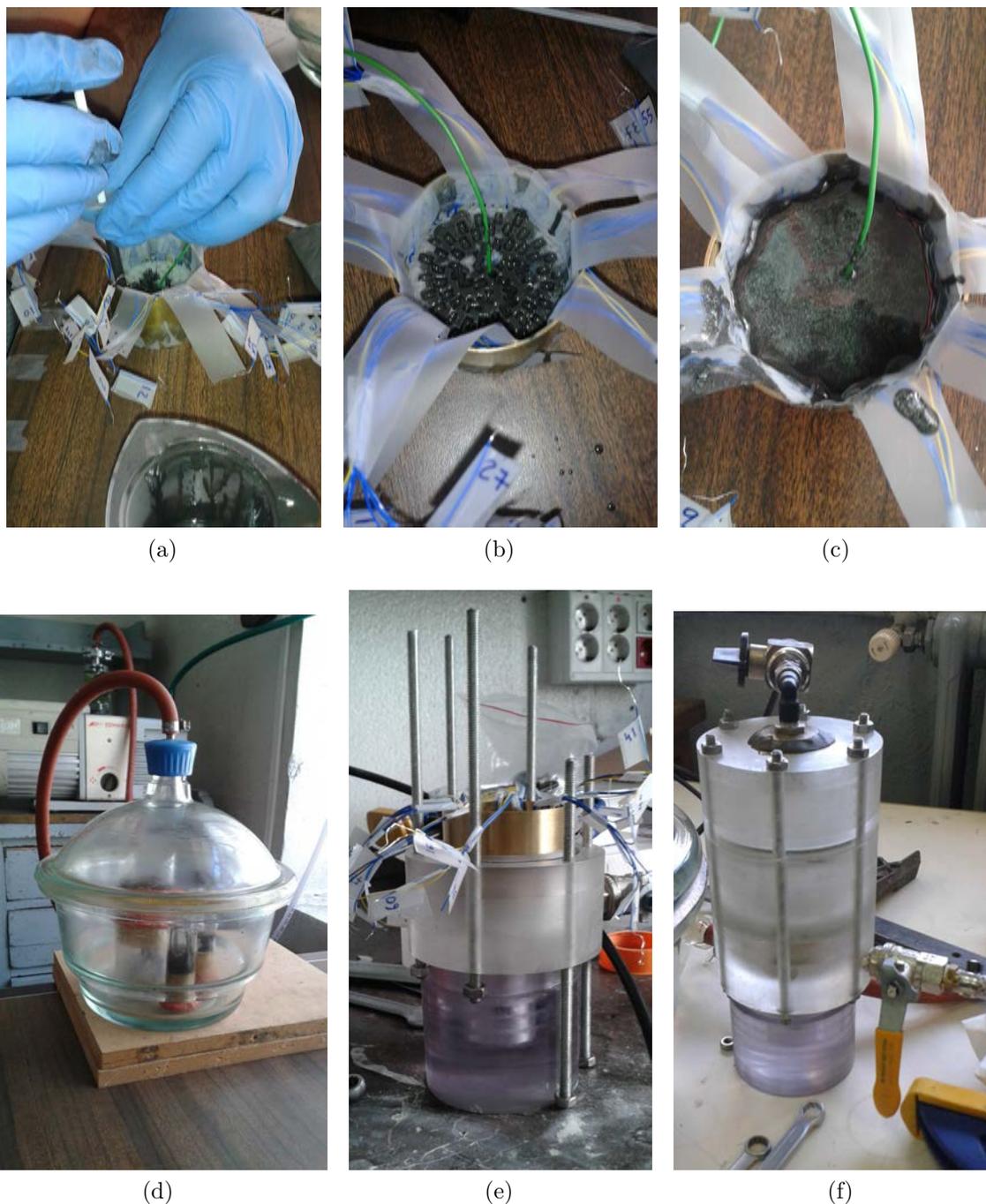


Figura 3.13: (a), (b) y (c) Proceso de sintetizado del backing. (d) Campana de vacío. (e) y (f) Cámara de presión construida en el taller de mecanizado del ITEFI-CSIC.

3.2.4. Fabricación de la capa de adaptación

La capa de adaptación, también denominada *matching layer*, tiene la función principal de mejorar la transferencia de energía hacia el medio de insonificación buscando el

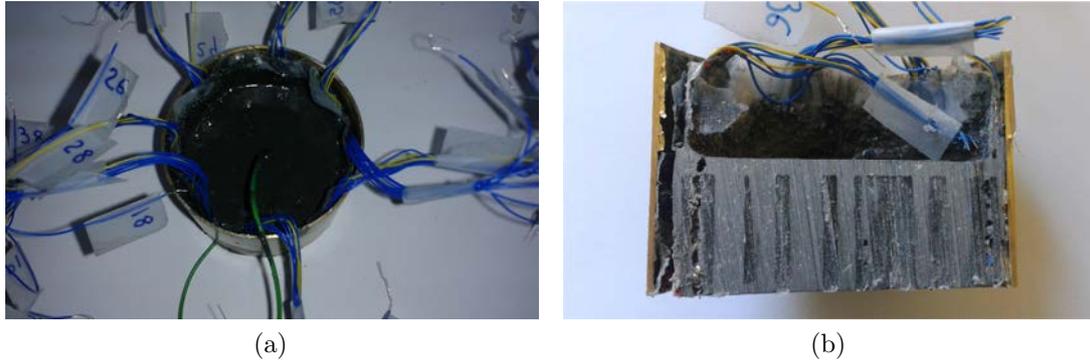


Figura 3.14: (a) Capa de backing finalizada. (b) Corte transversal de la capa de backing. Las zonas más oscuras son la estructura de plástico, las más claras son el backing; las partículas de color claro pertenecen a la goma añadida a la mezcla.

acoplamiento de impedancia acústica entre la cerámica y el medio. Adicionalmente, sirve de protección a los elementos contra golpes y rozaduras y a la plata conductiva del plano de masa contra el desgaste producido en el medio. Sus dos parámetros constructivos son impedancia y espesor.

El valor de la impedancia Z_{ml} debe ser intermedio entre las dos impedancias a adaptar, la de la cerámica piezoeléctrica empleada (Z_{pz27}) y la del agua (Z_{agua}). Frecuentemente se emplea su media geométrica, menos sensible a valores extremos que la aritmética [6]:

$$Z_{ml} = \sqrt{Z_{pz27} Z_{agua}} = \sqrt{(30,03 \times 10^6) \times (1,5 \times 10^6)} = 6,7 \text{ MRayls} \quad (3.2)$$

Por tanto, para seleccionar el material de la capa de acoplamiento se debe buscar aquel cuyo valor de impedancia esté cerca de 6,7 MRayls. Inspeccionando la densidad y la velocidad de propagación de los materiales listados en [62] se deduce que es conveniente utilizar algún tipo de resina epoxi. Se construyeron capas de adaptación con dos tipos de adhesivos epóxicos (Electrolube ER2220 y Araldite RX771C/HY1300), de velocidades de propagación 3200m/s y 2800m/s y densidades de $1,8\text{gr/cm}^3$ y $1,2\text{gr/cm}^3$, respectivamente, lo que implica impedancias suficientemente próximas a la requerida:

$$Z_{epoxyML1} = 3200 \times 1800 = 5,8 \text{ MRayls} \quad (3.3)$$

$$Z_{epoxyML2} = 2800 \times 1200 = 3,4 \text{ MRayls} \quad (3.4)$$

A pesar de su menor impedancia, el segundo material resultó más adecuado al ser menos glutinoso.

El espesor de la capa de adaptación debe ser aproximadamente igual a la cuarta parte de la longitud de onda del material con el que está fabricada. Así, en base a la velocidad de propagación del sonido en la capa de adaptación c y a la frecuencia de trabajo f_c :

$$\lambda/4 = \frac{c}{4 \times f_c} = \frac{2800}{4 \times 10^6} = 0,7 \text{ mm} \quad (3.5)$$

Esta capa va colocada directamente sobre el plano de masa del transductor. Para su colocación se vierte el pegamento epoxi sobre dicho plano y se somete a la mezcla a un proceso de desgasificación para extraer las burbujas de aire de su interior. Una vez curada la capa de pegamento, se debe proceder a su desbaste para conseguir el espesor deseado de $\lambda/4$ y una superficie plana y regular. Esta fase debe hacerse de forma muy controlada y por etapas y procurando no ajustar excesivamente en cada una de ellas. En cada paso es necesario verificar la sensibilidad, ancho de banda e impedancias. A medida que nos acercamos al espesor deseado, se deberían obtener mejores valores y unas gráficas de impedancia sin desplazamientos ni picos de resonancia. Cuando se logra el espesor óptimo, el transductor queda sintonizado.

En la figura 3.15 se muestran algunas imágenes tomadas durante la fabricación de una capa de adaptación.

Para la validación experimental, nuestro prototipo de laboratorio se encontrará sumergido en agua ($Z=1.5 \text{ MRayls}$), por ello es posible prescindir de la capa de adaptación al ser el propio medio el encargado de realizar gran parte de la función de acoplamiento. Por contra, la anchura de banda de los pulsos emitidos podría no ser óptima.

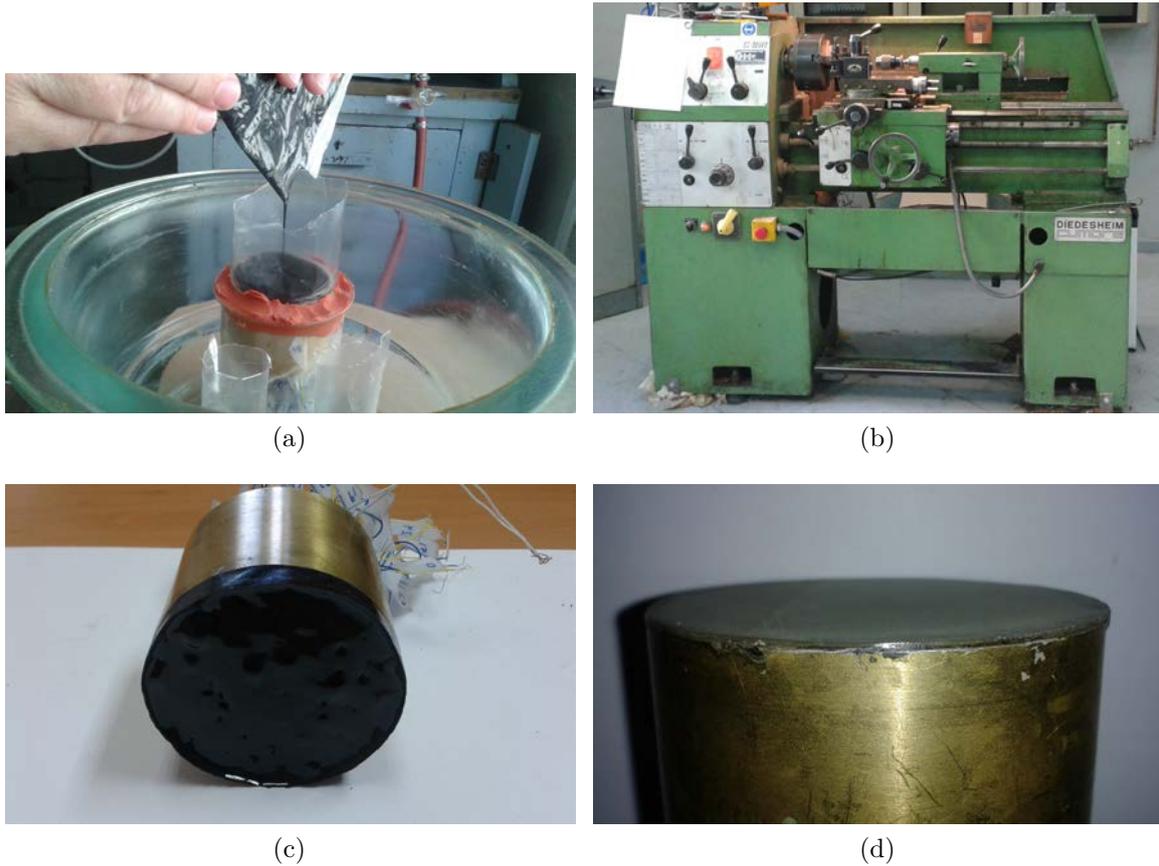


Figura 3.15: Proceso de fabricación de la capa de adaptación: (a) vertido de la resina epoxy sobre molde de papel adhesivo, (b) torno utilizado para desbaste, (c) capa de adaptación antes de su desbastado, (d) capa de adaptación finalizada (el prototipo de la imagen es distinto al de la fotografía anterior.)

Capítulo 4

MEDIDAS EXPERIMENTALES: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. PROTOTIPOS CONSTRUIDOS

En la figura 4.1 se exponen los cuatro prototipos de 64 elementos fabricados. Se les asignó la nomenclatura de identificación EFx , donde EF hace referencia a la distribución geométrica empleada (Espiral de Fermat) y x indica el orden cronológico de construcción.

Durante la fabricación de los tres primeros se produjo un error en una etapa determinada que nos hizo emprender la construcción de una nueva apertura. En todos ellos se siguió el procedimiento de fabricación aquí descrito, realizando modificaciones progresivas en diseño o procedimiento con el fin de optimizar el proceso en diferentes fases (diseño de la estructura, método de inserción de los elementos, tipo de conexión, etc ...). A continuación se describen brevemente los defectos que se produjeron durante su elaboración:

- EF1: para sintetizar el backing de este prototipo se empleó una fracción de peso de tungsteno alta, en concreto del 0.5, y como matriz, el epoxi bicomponente Electrolube ER2220, de alto tiempo de curado (24 horas a 23°C) y viscosidad media (15000 mPa a 23°C). La mezcla resultó ser demasiado densa y la matriz plástica no llegó a fluir completamente entre el tungsteno (ver figura 4.2a), imposibilitando un correcto precipitado en la estructura destinada a contener el backing. Esto hizo que nos replanteásemos materiales y composición, eligiendo finalmente como matriz la resina epoxi de muy baja viscosidad Araldite 2020. Una vez descartada

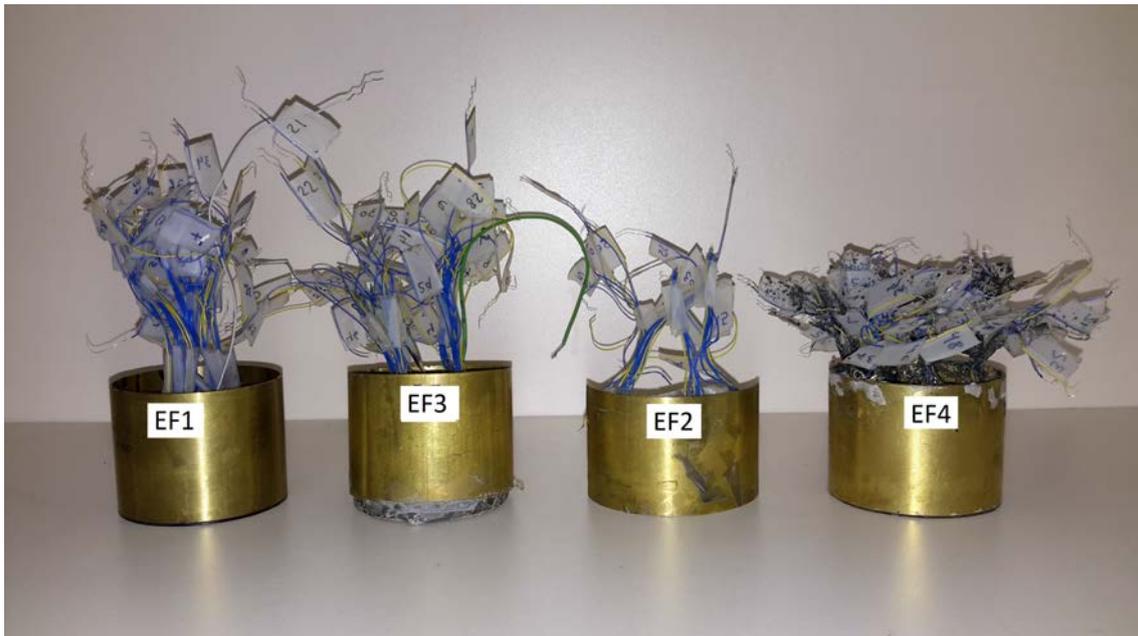


Figura 4.1: De izquierda a derecha, prototipos EF1, EF3, EF2 y EF4

esta apertura, se le acopló una capa de adaptación para ensayar su fabricación. La elevada viscosidad del adhesivo empleado (Electrolube ER2220) produjo que el proceso de desgasificación no pudiera ejercer bien su función, quedando fases de aire en su interior. Además, en la campana de vacío, por algún efecto durante la extracción de aire, el disco inferior de la estructura quedó combado. En la figura 4.2b se muestran estos defectos.

- EF2: tal y como se comentó en el apartado de fabricación de la capa de backing, cuando la proporción de tungsteno es suficientemente elevada se vuelve conductora. Aunque en transductores monoelemento esto puede ser una ventaja ya que permite sacar el cableado a través de ella, en los arrays debe evitarse. A pesar de que en esta apertura se usó la misma proporción de componentes para la mezcla que en las anteriores, una capa muy delgada pero suficiente de material de backing de alta densidad precipitó excesivamente hacia la parte inferior del disco de la estructura, introduciéndose en los canales del cableado y poniendo en contacto eléctrico a los elementos (ver figura 4.3). Por este motivo, se replanteó el diseño de las estructuras del transductor.
- EF3: en esta ocasión, el proceso de fabricación de la capa de backing fue correcto, sin embargo al introducir el transductor en la cámara de presión no se apoyó

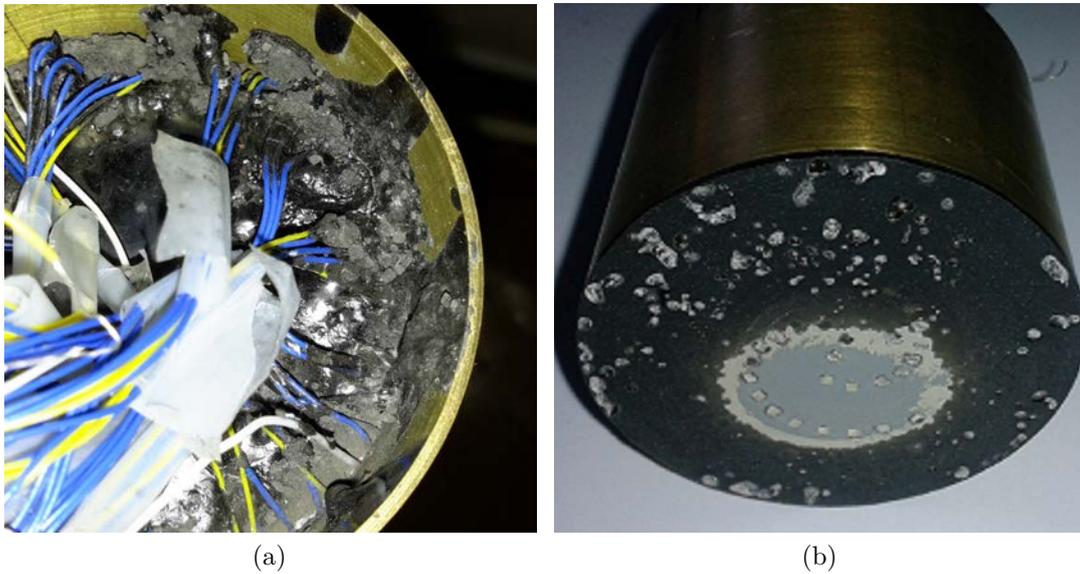


Figura 4.2: EF1: (a) proceso de mezcla del backing defectuoso, se aprecian grumos de componentes mal mezclados; (b) capa de adaptación con burbujas de aire y disco inferior deformado por efectos de la presión.



Figura 4.3: EF2: corte longitudinal del disco; se puede observar los canales del cableado inundados de material de backing conductivo.



Figura 4.4: EF3: disco inferior separado de la estructura superior.

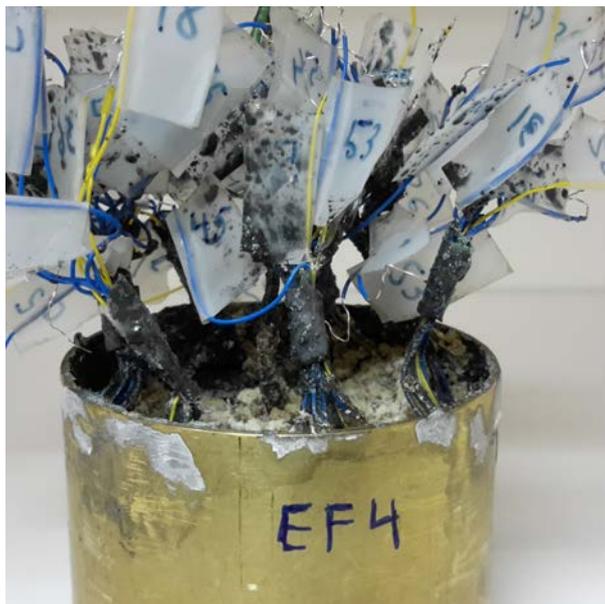
correctamente en su base, quedando el disco separado de la estructura superior por efecto de la presión, arrastrando con él a la contramasa y arrancando parte del cableado; ver figura 4.4.

Como se comprueba, en la mayoría de las ocasiones el fallo de construcción estuvo relacionado con el funcionamiento de algunos de los instrumentos empleados en la fase del sintetizado del backing, lo cual no invalida el procedimiento general de fabricación aquí propuesto.

EF4 es el prototipo elegido para la validación experimental. Durante su construcción se emplearon cada una de las opciones calificadas como óptimas en el anterior capítulo. No obstante, durante el proceso de desgasificación de esta apertura, y debido a una deficiente protección de su cableado, los cables quedaron excesivamente impregnados de material de backing. Una vez seco este material, provocó la rotura de alrededor del 20% de los cables, quedando varios elementos sin conexión eléctrica. Este inconveniente tan solo tuvo lugar en este prototipo y, como se aprecia en la figura 4.5a, la rotura se produjo por la parte superior. Por tanto, consideramos que este inconveniente no supone una falla en la fragilidad del sistema de conexión de nuestro procedimiento.

4.1.1. Medidas realizadas sobre el prototipo EF4

La indicación concluyente del buen desempeño de un array ultrasónico es su habilidad para mostrar buenas características de campo acústico, concordancia con el modelo de



(a)

Figura 4.5: EF4: Cables impregnados de material de backing.

simulación y, como último paso, su capacidad para formar una imagen. Sin embargo, la calidad de la imagen no depende solo del transductor sino también del sistema electrónico de emisión/recepción y de los algoritmos de procesamiento de señal; por ello es difícil valorar un array basándose solamente en el análisis de la imagen. Por tanto, nuestro trabajo experimental se ha centrado en la caracterización electromecánica y del patrón de vibración de los elementos. Por limitaciones de tiempo, no se realizó la caracterización de campo ni la generación de imagen 3D, acciones que serán tomadas en un futuro inmediato por el grupo de investigación en el que se encuadra este trabajo. Las medidas realizadas sobre los elementos del prototipo EF4 se encuentran resumidas en la tabla 4.1.

4.2. CARACTERIZACIÓN ELECTROMECAÁNICA

4.2.1. Medida de la impedancia

La caracterización de un array, como la de cualquier transductor piezoeléctrico monoelemento, ha de comenzarse midiendo la impedancia eléctrica de entrada de sus elementos, lo que determina las características de su transducción electromecánica. Hay que señalar que una caracterización completa normalmente requiere de un contraste con

PROPIEDAD	VALOR
Número de elementos	64
Ángulo de divergencia de la espiral de Fermat	140°
Diámetro de la apertura	45 mm
Módulo de la impedancia eléctrica promedio (sin backing)	6,6 \pm 1,9 k Ω
Fase de la impedancia eléctrica promedio (sin backing)	-45 \pm 11°
Frecuencia central promedio (sin backing)	647 \pm 20,1 kHz
Ancho de banda promedio (con backing)	55,9 \pm 6.8 %
Factor de calidad	1,6
Longitud de pulso típico (con backing)	3.5 - 5 μ s
Sensibilidad promedio (sin backing)	61.6 \pm 7.6 dB
Sensibilidad promedio (con backing)	51.3 \pm 6.4 dB
Punto focal en agua ($Diámetro^2/4\lambda$)	24 cm aprox.

Tabla 4.1: Resumen de las características del prototipo EF4.

un modelo teórico de transducción. En el caso del presente trabajo, los modelos teóricos menos complejos, los unidimensionales, no son aplicables debido a la geometría de los elementos y a sus diversos modos de vibración. Los métodos analíticos o por elementos finitos son los más adecuados, permitiendo además una optimización del diseño. Sin embargo, el empleo de estas herramientas no son objetivo de este trabajo aunque su desarrollo podría ser interesante en un futuro proyecto.

En primer lugar, se procedió a la medida de la magnitud y ángulo de fase de la impedancia eléctrica de entrada de cada elemento del array a través de su banda de paso, utilizando un analizador o puente de impedancias (1260 Impedance/Gain-Phase Analyzer de Solartron Analytical) con configuración en paralelo. Se llevaron a cabo medidas antes y después de acoplar la capa de backing al transductor, en aire y sumergiendo su cara emisora en agua, el medio de inspección elegido. En la figura 4.6 se muestra el montaje experimental realizado.

4.2.1.1. Sin capa de backing

Primeramente se midieron en aire los valores del módulo y fase de las impedancias eléctricas de entrada de todos los elementos del prototipo EF4 antes de añadirle la contramasa. La figura 4.7 representa la curva de impedancia (módulo y fase) de un elemento cuyo comportamiento es representativo dentro del array, mostrando la clásica curva de impedancia de una pieza piezoeléctrica. La gráfica de color azul corresponde al módulo y sus rangos de valores se sitúan a la izquierda. Se identifican dos picos que



Figura 4.6: Montaje experimental para la medida de impedancias con el equipo analizador.

ocurren a la frecuencia mínima (también llamada de resonancia o serie) y máxima (o de antiresonancia o paralelo), entre la que se sitúa la banda de paso del elemento. El valor de impedancia correspondiente a la frecuencia central, $6,5 k\Omega$ se sitúa por tanto, entre ambos picos. En el caso de los elementos de nuestro array sin capa de backing, estos valores se hallan muy cercanos al punto más bajo de la gráfica, coincidiendo prácticamente con la frecuencia mínima. Observando en la gráfica este último valor, en torno a 672 kHz, se puede anticipar que las frecuencias de trabajo de nuestro array estarán lejos del Megahercio. En la misma figura, la gráfica de color rojo (rango de valores a la derecha) pertenece a la fase y presenta valores negativos lo que se corresponde con el carácter capacitivo (reactancias negativas) de los elementos transductores. En la figura 4.8, se ha representado el primer armónico de la curva de impedancia de un elemento de piezocomposite vibrando en modo espesor 'puro'. Se aprecian cambios de impedancia más bruscos en torno a los picos de frecuencia, característica que nuestros elementos han perdido como consecuencia de la interferencia de otros modos de vibración en la misma banda.

La figura 4.9 resume todas las impedancias medidas, presentando un promedio y desviación típica de $6,6 \pm 1,9 k\Omega$ para el módulo y de $-45 \pm 11^\circ$ para la fase. En los valores del módulo observamos una apreciable dispersión de tal manera que entre el mínimo y máximo valor existe un incremento de unos $10 k\Omega$. Tal y como se explicará

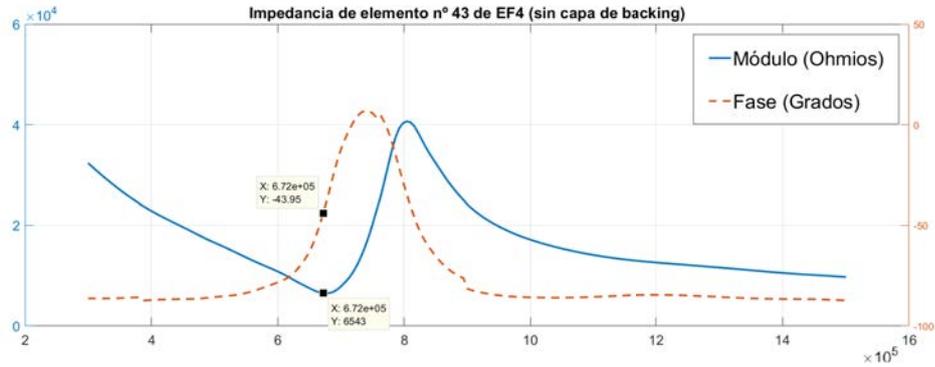


Figura 4.7: Módulo y fase de la impedancia de un elemento representativo de EF4.

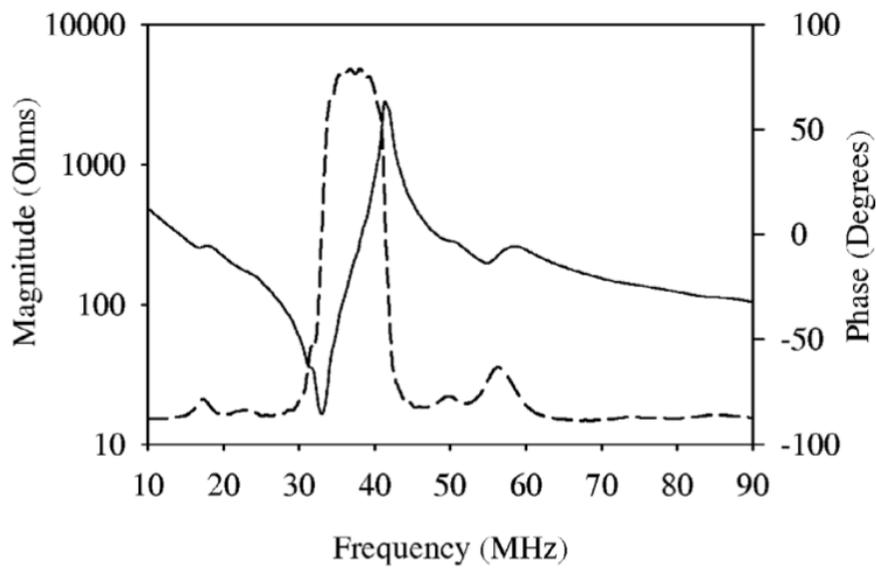
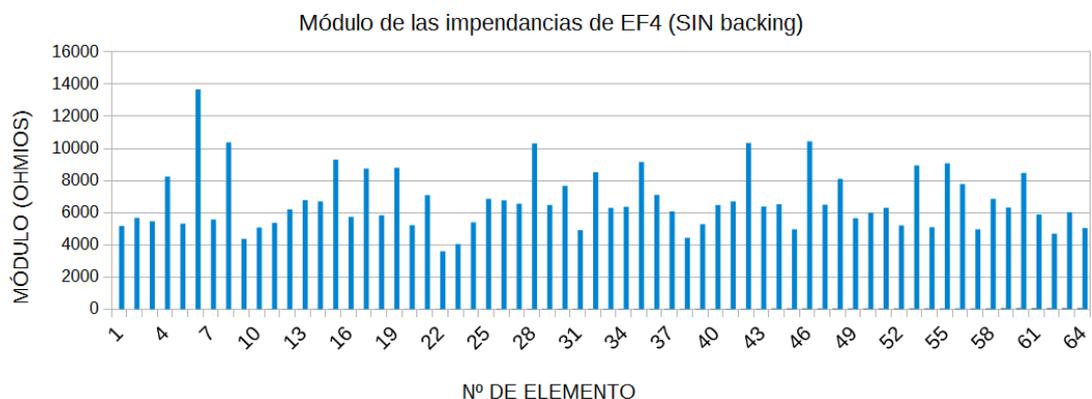
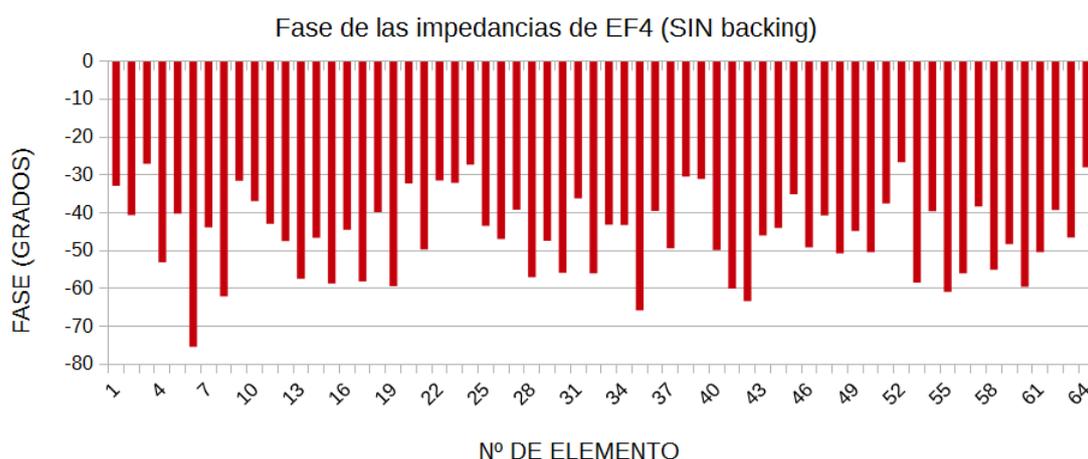


Figura 4.8: Módulo y fase de la impedancia de una pieza de composite vibrando en modo thickness. Fuente: [63].

más extensamente al final del capítulo, estas diferencias podrían tener su origen en el procedimiento de fabricación.



(a)



(b)

Figura 4.9: Resumen de los valores de impedancia de EF4: (a) módulo (promedio: $6,6 \pm 1,9 \text{ k}\Omega$), (b) fase (promedio: $-45 \pm 11^\circ$).

4.2.1.2. Con capa de backing

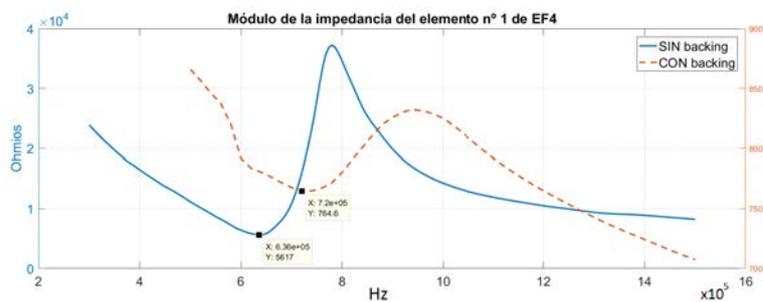
Como se señaló en el comienzo del capítulo, tras acoplar la capa de amortiguación al prototipo EF4 se perdieron varios elementos al romperse su cable eléctrico correspondiente. Por ello, no se llevó a cabo una medida del array completo con capa de backing, eligiéndose cuatro elementos representativos, situados en cada una de los brazos de la espiral y a diferentes distancias del centro.

En la figura 4.10 se compara las curvas de impedancia de los cuatro elementos, antes y después de colocar el backing con la apertura sumergida en agua. Los rangos en el eje de coordenadas son diferentes, el de la izquierda (gráfica azul) pertenece al array sin backing mientras que el de la derecha (gráfica roja) hace referencia al array con backing. Se observan cuatro fenómenos:

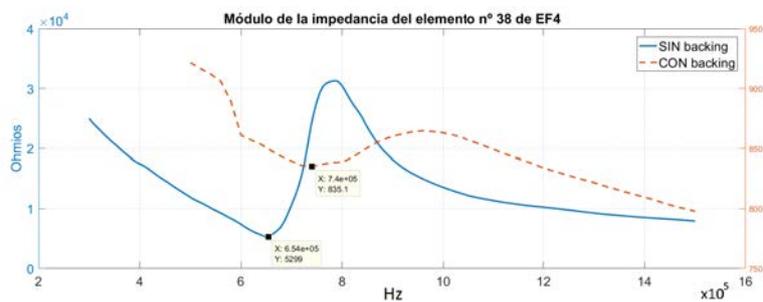
- Una considerable disminución en la amplitud de las frecuencias de máxima y mínima impedancia, lo que se traduce en un amortiguamiento de las oscilaciones. En el punto de resonancia se experimentan bajadas de $5 - 6k\Omega$, lo que implica una reducción del 85 % aproximadamente.
- Mayor homogeneidad en los valores de impedancia a la mínima frecuencia de pico. Mientras que la dispersión sin capa de backing indicó un valor en torno al 30 %, la variación del módulo de la impedancia con la capa de respaldo se reduce al 8 % en los cuatro elementos medidos.
- Ensanchamiento de la banda de paso entre las frecuencias de resonancia y antiresonancia.
- Desplazamiento del pico de resonancia hacia valores más altos, con un incremento aproximado de 100 kHz. Esto supondría un aumento de la frecuencia central de los elementos al añadir la contramasa, lo que es un factor a considerar dados los rangos de frecuencia en los que trabajamos.

4.2.2. Caracterización del pulso emitido

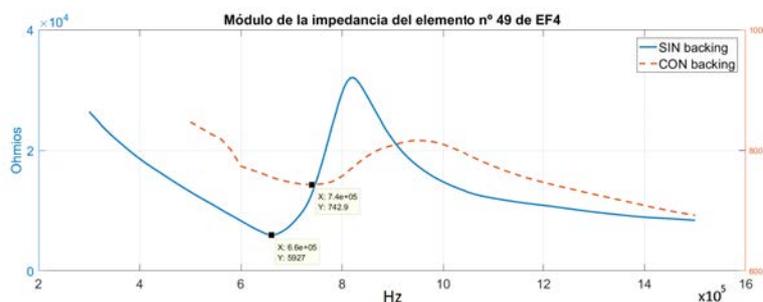
Para obtener las características de los pulsos emitidos se utilizó el test más comúnmente empleado para arrays de transductores, la respuesta en pulso-eco. Se extrajeron los valores de frecuencia central, ancho de banda, longitud de pulso y sensibilidad. Para ello, nos ayudamos del equipo de ultrasonidos monocanal Ultrascop de Dassel Sistemas conectado a un PC para el control y visualización de los pulsos por medio del software Ultraview, también desarrollado por Dassel Sistemas. La figura 4.11 muestra el montaje experimental, con el prototipo situado en un tanque de agua, frente a un bloque de aluminio macizo como reflector.



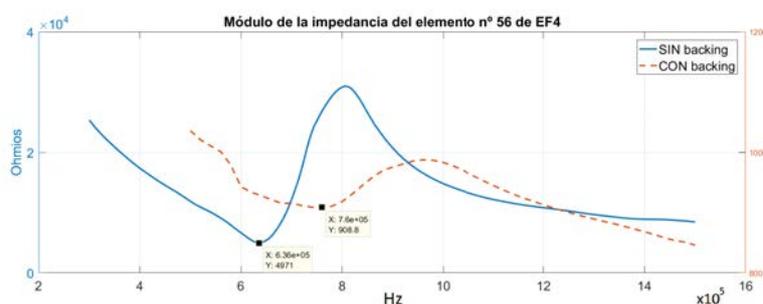
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.10: Módulo de la impedancia de 4 elementos representativos de EF4, antes y después de añadir la capa de backing, en color azul y rojo, respectivamente.

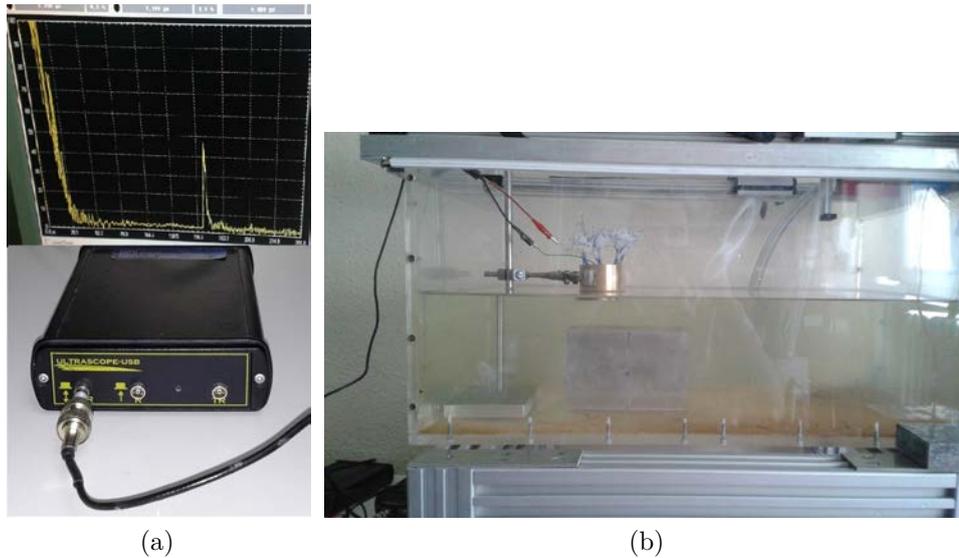


Figura 4.11: Montaje experimental para la caracterización de los pulsos: (a) equipo de ultrasonidos Ultrascope + software Ultraview, (b) prototipo sumergido en tanque de agua con su cara emisora frente a una pieza de aluminio.

4.2.2.1. Frecuencia central

Para obtener la respuesta en frecuencia de los ecos recibidos, se capturaron las señales con MATLAB y se realizó su análisis FFT. La frecuencia central (f_c) se calculó a partir de la frecuencia de pico y las de corte (f_i y f_s) a -6 dB:

$$f_c = (f_i + f_s)/2 \quad (4.1)$$

La figura 4.12 recapitula las frecuencias centrales obtenidas de todos los elementos del array antes de acoplar la capa de backing. Se demuestra que el comportamiento del array es suficientemente uniforme en este sentido. La frecuencia promedio es de unos 650 kHz, con una desviación típica de ± 20 kHz. Tal y como estaba previsto, las dimensiones de los elementos tienen como consecuencia una notable pérdida de energía en el modo espesor con la consecuencia del distanciamiento entre la frecuencia central media del array y el Megahercio. El reemplazo de los elementos utilizados por piezocomposite 1-3 debería ofrecer una visible mejora de esta característica [44, 64]. Como se comprobó en el apartado anterior, durante la caracterización de las curvas de impedancia con capa de respaldo se evidenció un aumento considerable en los valores de frecuencia pero, debido a la pérdida de elementos y a la imposibilidad de medir el array completo, no se elaboró un compendio de la totalidad de los valores de frecuencia con dicha capa.

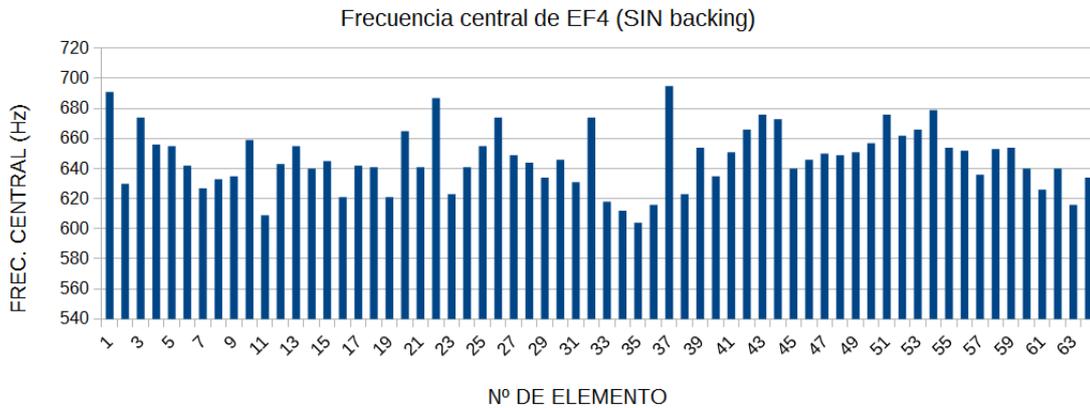


Figura 4.12: Resumen de los valores de frecuencia central de EF4 (promedio: 647 \pm 20,1 kHz).

4.2.2.2. Ancho de banda

Con las frecuencias centrales calculadas en el apartado anterior y las frecuencias de corte (f_i y f_s) a -6 dB se calcularon los anchos de banda ($BW(\%)$) según la expresión:

$$BW(\%) = ((f_s - f_i)/f_c) * 100 \quad (4.2)$$

La medida se realizó con capa de backing. La figura 4.13 resume los datos obtenidos de los anchos de banda medidos sobre el 80% de los elementos operativos. Presenta buenos valores, de promedio 55,9% y desviación típica \pm 6,8%. La mayoría se sitúan por encima del $> 50\%$, lo que indica un comportamiento más que aceptable. Con estos valores podemos afirmar que el factor de calidad ($Q = f_c/BW$) promedio del array es de aproximadamente 1,5, lo que sitúa a Q por debajo de 5, valor recomendable para ensayos no destructivos [7].

4.2.2.3. Longitud de pulso

La figura 4.14a muestra un eco característico del array, acompañado de la representación de su ancho de banda ($BW=58\%$), (figura 4.14b). Se observa que se trata de un pulso de pocos ciclos y con una forma de onda bien definida, lo que permite una adecuada inspección en el medio.

Para contrastar el efecto de la capa de backing sobre la longitud de los pulsos emitidos, se excitaron impulsivamente y en aire cuatro elementos representativos de la espiral antes

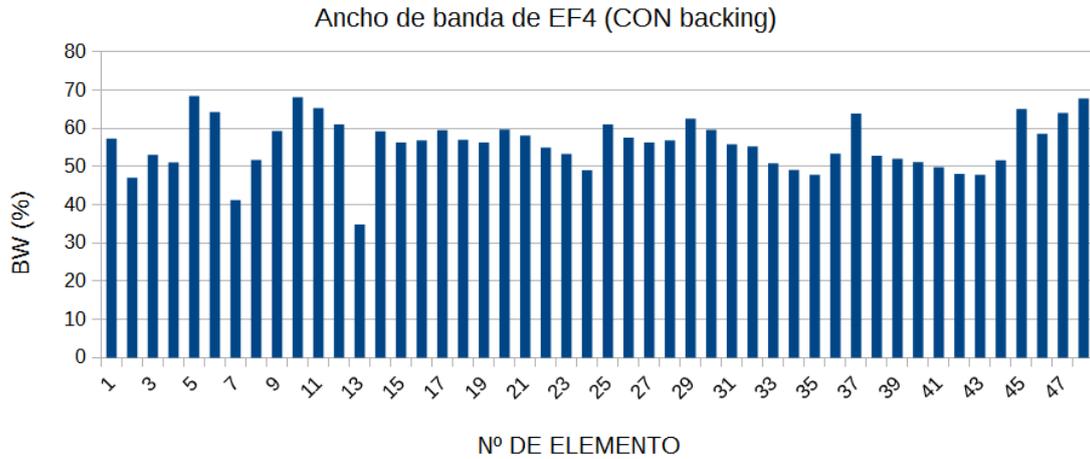


Figura 4.13: Resumen de los anchos de banda de EF4 (promedio: $55,9 \pm 6,8\%$). La gráfica recoge tan solo los elementos operativos.

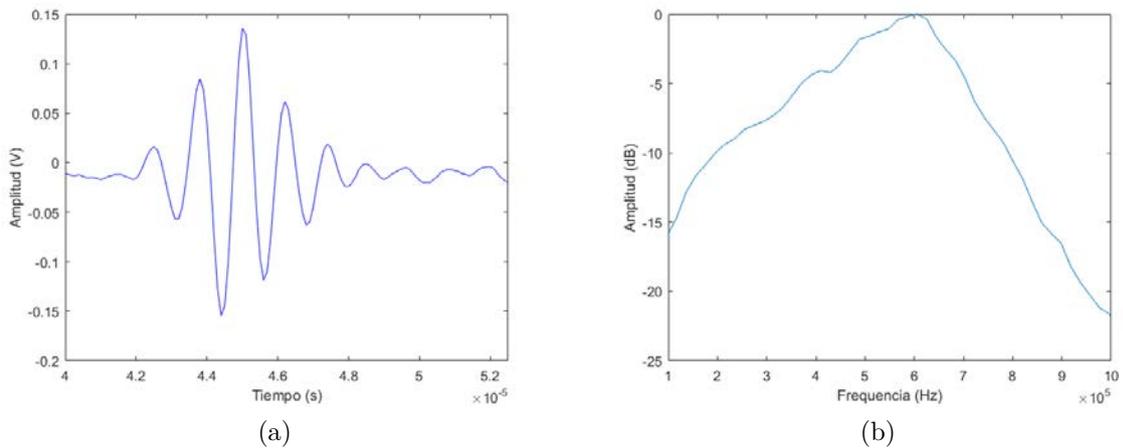


Figura 4.14: Típico pulso-eco de EF4: (a) en el dominio del tiempo, (b) en el dominio de la frecuencia.

y después de añadir dicha capa y se observó su respuesta. En la figura 4.15 se exponen en color rojo dichos pulsos sin capa de backing y en color azul tras acoplarla. Queda patente su efecto en el acortamiento del número de ciclos, con una significativa reducción del 60% aproximadamente.

Para calcular la longitud del pulso se tomó el largo de la señal en pantalla desde su máximo (Picomax) hasta su caída a -20 dB (Picomin):

$$\Delta dB = 20 * \log(Picomax/Picomín) \quad (4.3)$$

Se hallaron valores de entre 3,5 y 5 μs , lo que supone un comportamiento más que aceptable al permitir una resolución axial ¹ en agua ² de unos 3 mm.

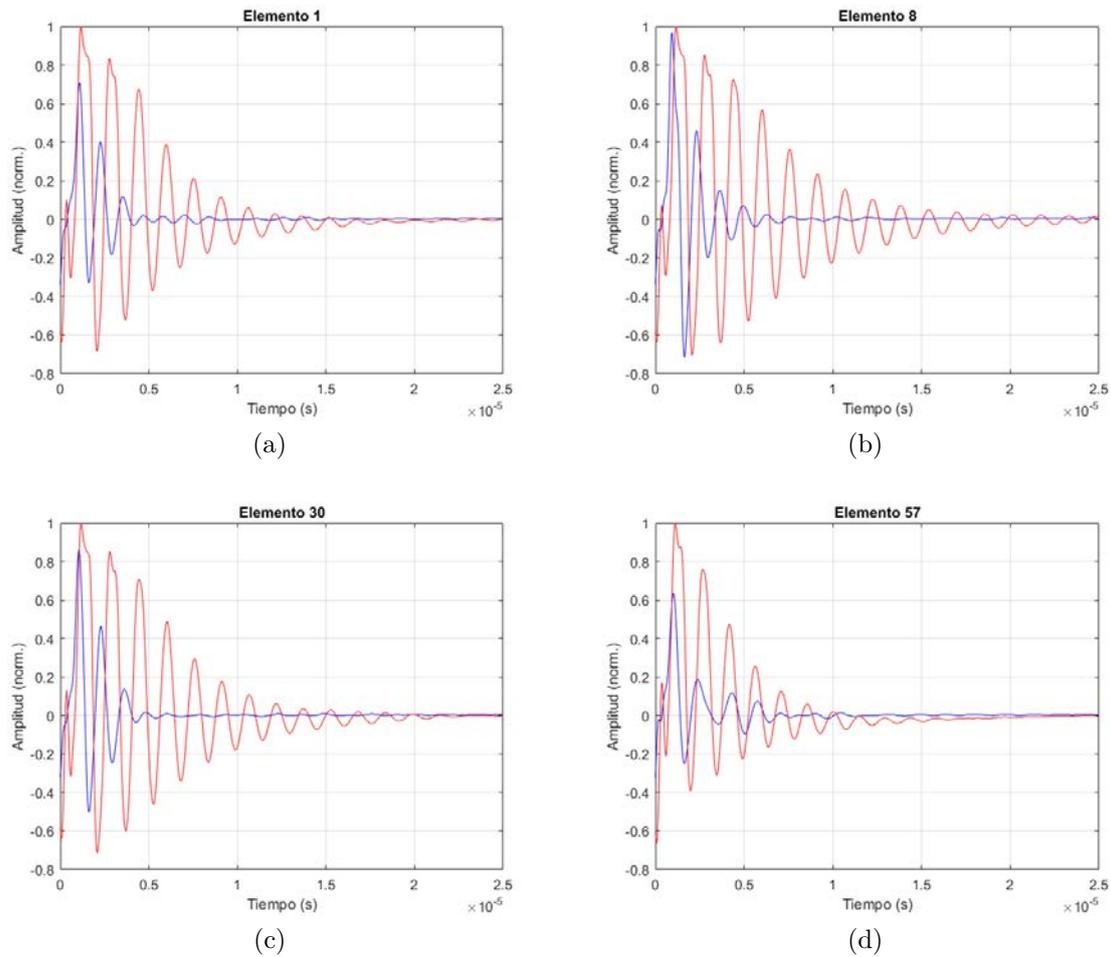


Figura 4.15: Efecto de la capa de backing en la respuesta de cuatro elementos de EF4. Se aprecia una considerable reducción en la longitud de los pulsos con amortiguación (en azul) respecto de los que no la tienen (en rojo).

¹Resolución axial = longitud espacial del pulso / 2

²La velocidad del sonido en tejido humano es muy similar a la del agua.

4.2.2.4. Sensibilidad

Para finalizar la fase de caracterización electromecánica, se realizó una medición de la sensibilidad de los elementos. Con el prototipo sumergido en el tanque de agua, empleando la función de envolvente de onda de Ultrascope y partiendo de una ganancia fija para todos los elementos, se aumentó ésta para llevar cada eco recibido al 90% de la altura en pantalla, anotando el valor de los decibelios necesarios. Al medir la respuesta recibida por cada elemento contra un reflector, ese valor nos mostrará las diferencias de eficiencia en pulso-eco de cada uno de ellos, indicando que los elementos más eficientes (los más 'sensibles') serán aquellos que requieran de menos ganancia. Estos valores deben ser tenidos en cuenta a la hora de ser corregidos en recepción con el fin de poder formar la imagen adecuadamente.

Las figuras 4.16 y 4.17 agrupan todas las medidas realizadas sin capa de backing y con ella. El promedio obtenido sin amortiguamiento es de 61.6 dB con una desviación típica de ± 7.6 dB. La dispersión es sustancial, existiendo una diferencia de 30.4 dB entre el valor mínimo y máximo. Se buscó mediante análisis estadístico una relación entre sensibilidad e impedancia acústica, obteniéndose valores para el coeficiente de correlación de Pearson de $r=-0.015$ para el módulo de la impedancia, $r=0.023$ para la parte real y $r=0.074$ para la parte imaginaria, lo que no nos permitió extraer conclusión alguna al indicar una relación prácticamente nula entre estos parámetros. Con capa de backing, los valores de sensibilidad mejoraron alrededor de 10 dB en promedio, exhibiendo una media de 51.3 ± 6.4 dB, lo que indica que la contramasa en su función amortiguadora del pulso ayuda a proyectar más energía hacia la parte frontal del transductor. En cualquier caso, y teniendo en cuenta que todos los elementos actúan en emisión/recepción ¹, estos discretos valores de sensibilidad podrían ser achacados a la baja eficiencia energética de los elementos piezoeléctricos utilizados.

¹Es decir, cada uno de ellos utiliza el mismo canal para la conversión de energía eléctrica en mecánica y viceversa.

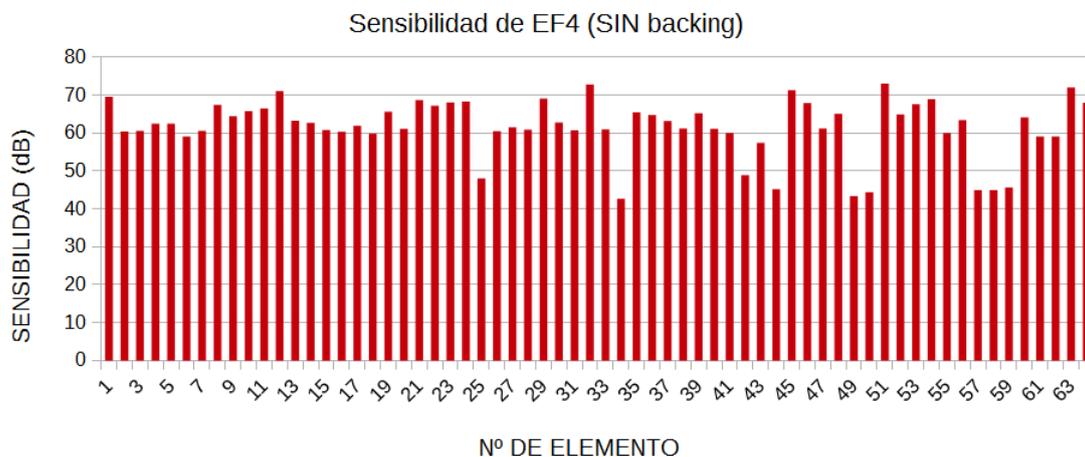


Figura 4.16: Resumen de los valores de sensibilidad de EF4 sin capa de backing (promedio: 61.6 +/- 7.6 dB).

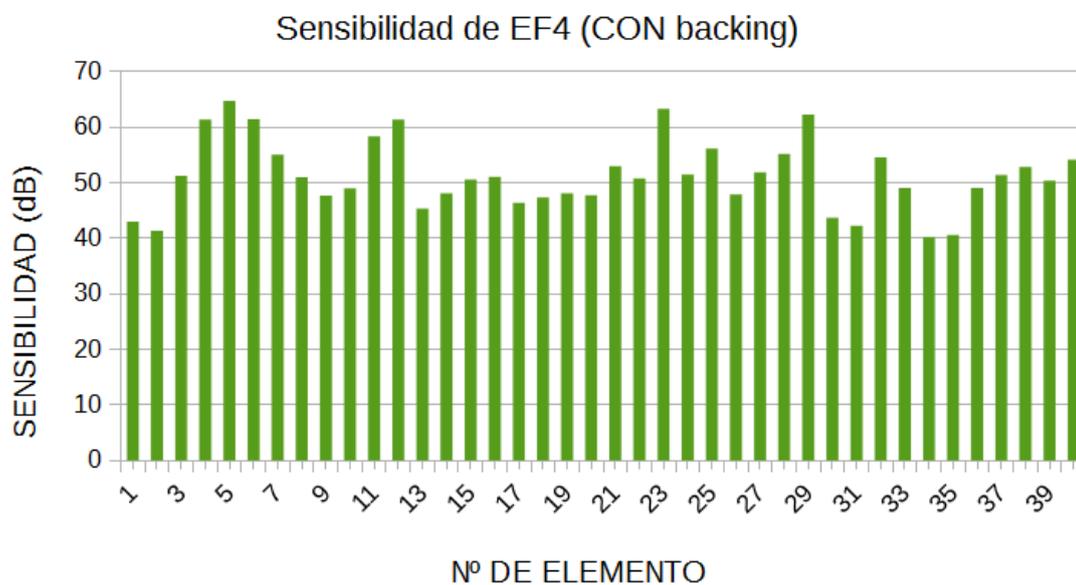


Figura 4.17: Resumen de los valores de sensibilidad de EF4 con capa de backing (promedio: 51.3 +/- 6.4 dB).

4.3. CARACTERIZACIÓN VIBROACÚSTICA Y MEDIDA DEL ACOPLAMIENTO ELECTRO-MECÁNICO

Una vez conocidas las propiedades del pulso característico emitido por el array, el siguiente paso es conocer el comportamiento de la vibración mecánica de los elementos, observando el tamaño de su apertura acústica, su homogeneidad de vibración y si hay diferencias entre ellos en cuanto a su amplitud. Por otra parte, se harán medidas de *crosstalk*¹ con el fin de medir el acoplamiento electromecánico entre elementos, lo que nos indicará si al vibrar se disparan o resuenan mecánicamente otros elementos. Esta comprobación reviste gran importancia ya que la focalización del haz del array se hace coordinando la acción de los elementos, lo que solo se puede lograr cuando están desacoplados. Además, un elevado nivel de acoplamiento mecánico entre ellos generará pérdidas de calidad de la imagen acústica.

Para realizar la medida se utilizó vibrometría láser usando el equipo Polytec PSV-400 (figura 4.18), compuesto por un rack de conexiones, un controlador de señal, un sistema de gestión de datos y una cabeza láser de escaneado sobre superficies 3D. Este equipo permite medir la amplitud y fase de la velocidad de vibración, desplazamiento y voltaje, en el dominio de la frecuencia y del tiempo.

Para realizar la prueba experimental, el transductor se posiciona horizontalmente sobre un soporte fijo, excitándose uno de sus elementos mediante impulsos a la frecuencia de resonancia. Mientras, el vibrómetro va realizando un barrido láser sobre su cara emisora de un número finito de puntos según una malla configurable, de manera que el sistema mide por interferometría la vibración en la superficie del transductor. Con ello se obtienen imágenes en pantalla del patrón de vibración. Hay que señalar que en este experimento existe una limitación en referencia a la falta de homogeneidad de la reflectividad de la superficie lo que puede introducir cierto nivel de ruido en el mapeo. En la figura 4.19 se expone un diagrama de la instrumentación empleada.

¹Fenómeno por el cual una señal transmitida por un circuito o canal de transmisión crea un efecto indeseable en otro circuito o canal.

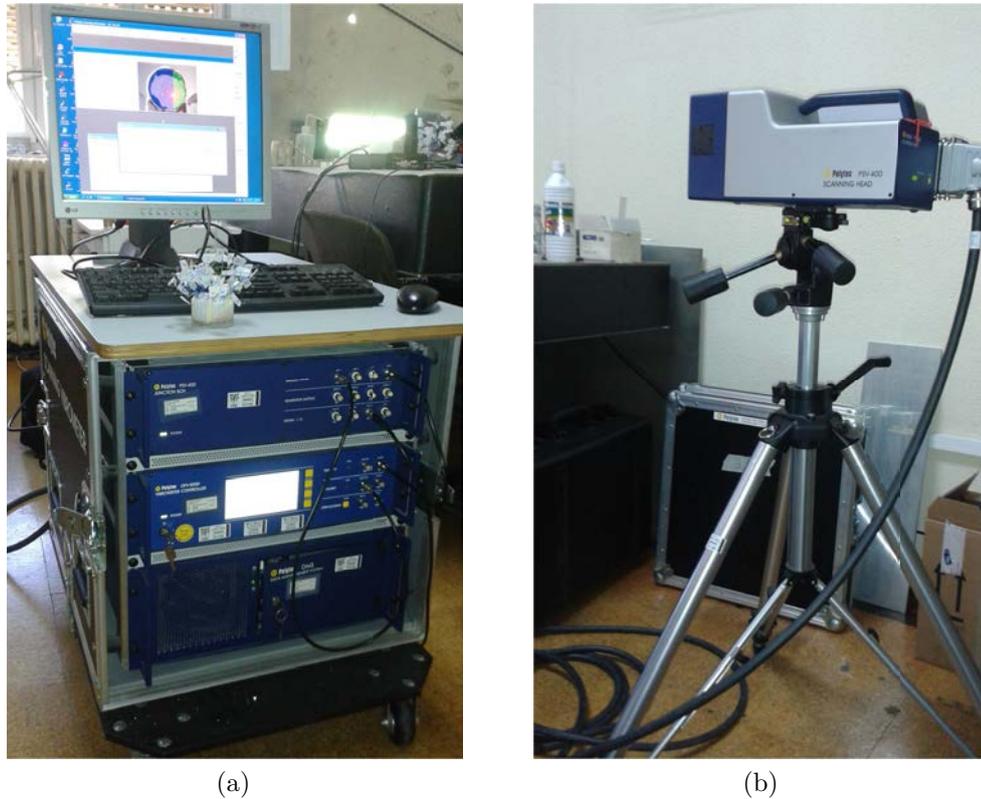


Figura 4.18: Polytec PSV-400: (a) Junction Box + Polytec OFV-5000 Controller + Data Manager System (DMS), (b) 3D Scanning Head.

4.3.1. Patrón de vibración

En la figura 4.20 se representa el valor eficaz (RMS) en decibelios del desplazamiento captado por el barrido realizado sobre 4 monoelementos representativos de EF4 sin capa de backing. Las tonalidades rojas y verdes representan las áreas de mayor y menor amplitud, respectivamente. Como se puede observar, a pesar de la no compensación eléctrica entre elementos y a las diferencias de impedancia y sensibilidad, la apertura acústica es similar en cada uno de ellos, tanto el tamaño del área radiante en la posición del elemento como de las zonas rojas que lo rodean. La amplitud de estas últimas, que indican ondas superficiales desplazándose por el disco de la estructura, cae suficientemente rápido de tal manera que no parecen inducir ningún modo de vibración significativo a los elementos adyacentes. Asimismo, se observa que, mientras el elemento está radiando, el resto de la superficie del array se mantiene en niveles de amplitud bajos, con una diferencia con la zona excitada de unos -24 dB, lo que indica un buen desempeño [44].

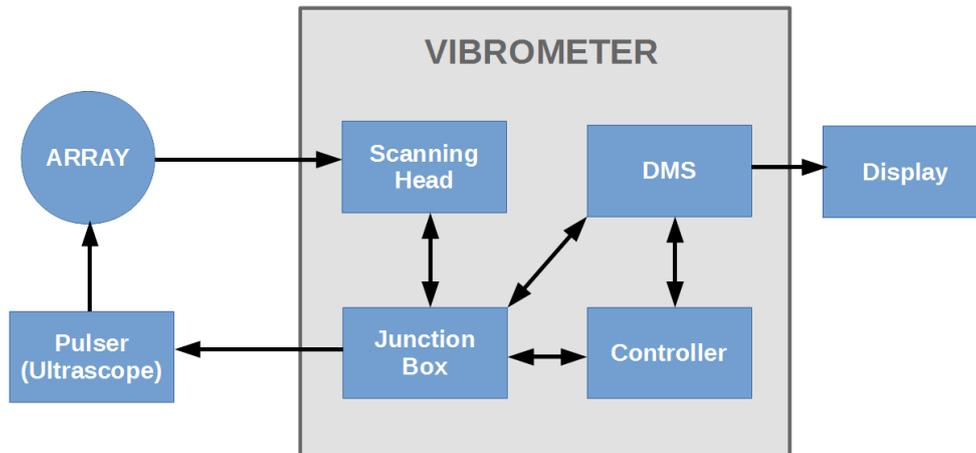


Figura 4.19: Diagrama del montaje experimental para la caracterización vibroacústica.

En las cuatro imágenes, aparecen zonas rojas aisladas, de pequeño tamaño y alejadas del elemento activo, que se deben posiblemente a ruido EMI (interferencias electromagnéticas) captado por los cables de los elementos que no fueron unidos a un punto común de masa.

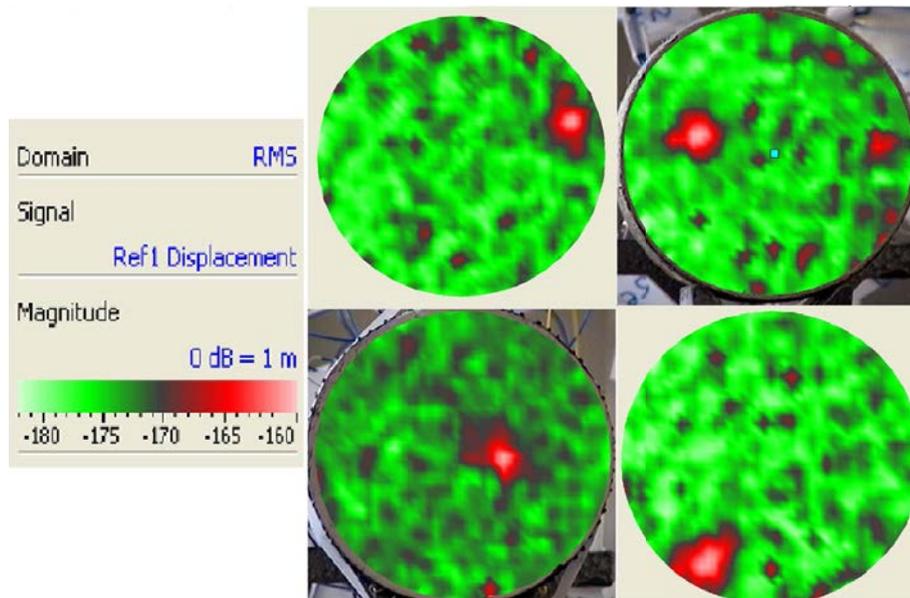


Figura 4.20: Valor eficaz (RMS) en dB del desplazamiento en la superficie emisora de EF4 al excitar cuatro elementos distintos.

Siguiendo la figura 4.21, se comprueba que cada elemento de EF4 resuena mecánicamente de forma independiente. Se muestran dos secuencias de imágenes pertenecientes a la vibración de la apertura en el dominio del tiempo, detenidas en el instante de

máxima amplitud de vibración del único elemento excitado. La imagen de la izquierda corresponde al prototipo EF4, que contrasta con la imagen de la derecha perteneciente al prototipo EF2, cuya capa de backing conductiva establece contacto eléctrico entre todos los elementos, con la consecuencia de la vibración de toda la espiral al unísono. Aunque no afecta al buen funcionamiento del array, la aparición en la imagen de puntos rojos y verdes situados de forma arbitraria evidencia un hecho: durante la construcción del array no se tuvo en cuenta la polarización de los elementos ¹ con lo que aparecen vibrando en oposición de fase (cada color representa un desfase de 180°). En la figura 4.22 se observa que el valor eficaz del voltaje en EF2 indica máximos de amplitud por toda la superficie de la apertura.

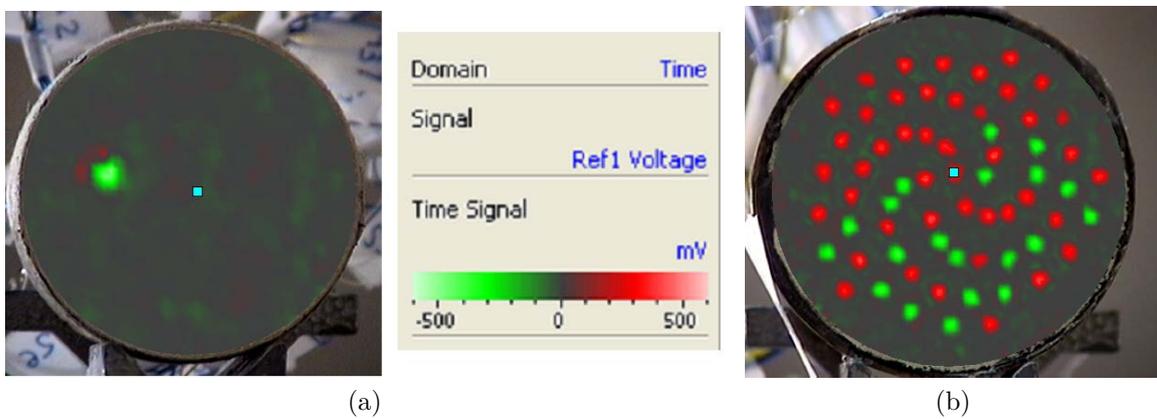


Figura 4.21: Instante de amplitud máxima de desplazamiento de la apertura al excitar únicamente un elemento; (a) EF4: aparece un solo elemento vibrando, (b) EF2: todos los elementos vibrando al unísono. Los puntos rojos y verdes indican vibración en oposición de fase.

4.3.2. Acoplamiento electromecánico

Para valorar los posibles efectos de *crossstalk*, se excitó un monoelemento escogido al azar y se compararon las señales recibidas sobre la banda de paso del array por otros tres elementos próximos a él. En esta ocasión, la medida también fue realizada antes de acoplar la capa de backing. En la figura 4.23 se muestran los resultados, el elemento señalado en la espiral en rojo representa al elemento excitado y aquellos en los que se midió el acoplamiento son los que aparecen en color negro. Como se puede apreciar,

¹En la mayoría de los casos, las piezas cerámicas piezoeléctricas se suministran con indicación de su polarización mediante una pequeña marca en uno de sus electrodos.

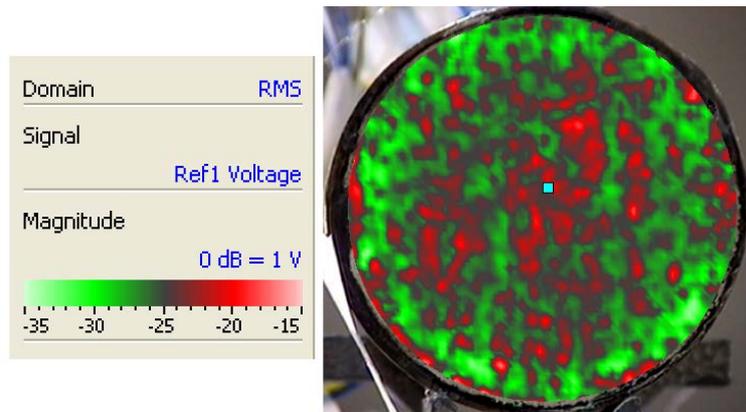


Figura 4.22: Valor eficaz (RMS) en dB del voltaje en EF2 al excitar un solo elemento.

durante toda la banda de frecuencia el nivel de acoplamiento es bajo, observándose un nivel de -15 dB a la frecuencia de resonancia en uno de los dos elementos más cercanos (segundo gráfico comenzando por arriba). Respecto a los otros dos elementos vecinos, algo más alejados, los niveles caen por debajo de -25 dB, lo que supone un resultado satisfactorio al estar por debajo de lo aceptado, sobre todo si consideramos que aún no se ha acoplado la capa de respaldo y que, por tanto, representa el caso más desfavorable [44, 63]. Hay que señalar que, debido a la falta de reflectividad de la superficie, se observa cierta cantidad de ruido en la señal con lo que el sistema no permitió visualizar los valores exactos de la caída del nivel de amplitud.

4.4. ANÁLISIS CRÍTICO DE LOS RESULTADOS

A continuación, se harán una serie de consideraciones finales sobre la valoración del prototipo caracterizado, basándonos en las incidencias que tuvieron lugar durante el proceso de fabricación y en las medidas realizadas.

Ha quedado patente cierta debilidad de la estructura de plástico del transductor. Las figuras 4.2b y 4.4 expuestas en el primer apartado de este capítulo evidencian que los puntos débiles son la unión entre las dos estructuras y la resistencia del disco inferior. Aunque resisten bien la manipulación, no se mostraron tan sólidas al someterlas a presiones positivas o negativas.

Las metalizaciones de los electrodos cumplen su función y el sistema de conexión cable-elemento es firme ya que en ninguna de las aperturas el cable se desplazó de su posición. Sin embargo, en la apertura EF4, sobre la que se tomaron medidas, hubo

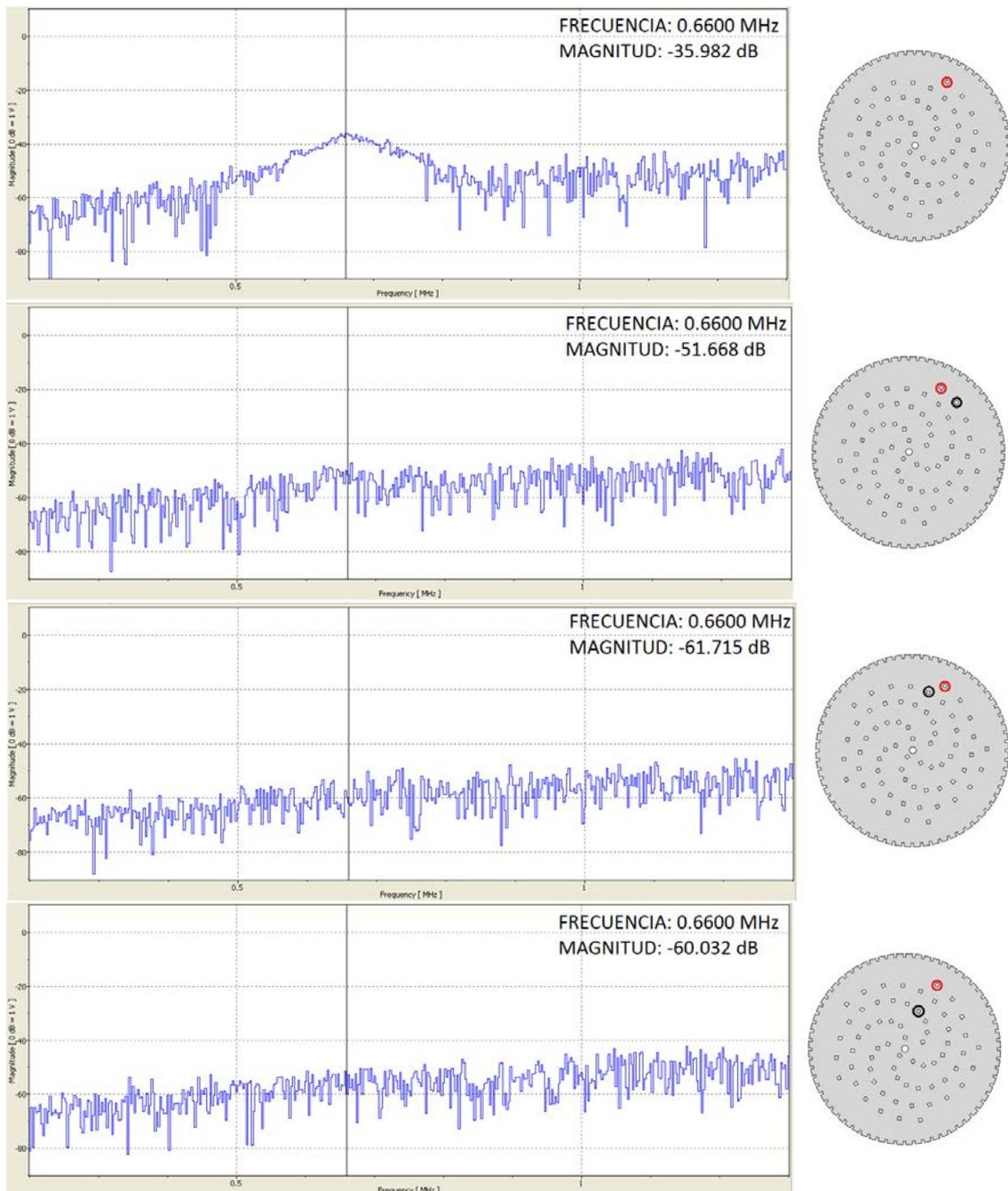


Figura 4.23: Medida de acoplamiento electromecánico entre elementos. Espectro de la señal recibida por varios elementos (en color negro en la espiral) cuando se excita uno solo (en color rojo).

pérdida de elementos por rotura de cables. Puesto que esto solo ocurrió en este prototipo

y todos los cables quebraron por la parte superior, consideramos que este contratiempo no invalida nuestro procedimiento.

La capa de backing queda correctamente dividida en columnas individuales, cumpliendo correctamente su función y amortiguando el pulso suficientemente para tomar medidas en laboratorio. Tras acoplarla, se observó un aumento de unos 100 kHz de la frecuencia central de los elementos testeados.

A EF4 se le añadió una capa de adaptación que no fue evaluada ya que se utilizó para ensayar el procedimiento de su fabricación y la elección de materiales. Durante las medidas de impedancia y ancho de banda no se observó una mejora sustancial en las características del transductor. En todo caso, cumple su función protectora.

Las medidas efectuadas han revelado un buen comportamiento del array en términos generales. Los valores de ancho de banda, longitud del pulso y acoplamiento entre elementos son aceptables. La frecuencia de trabajo de los elementos se muestra uniforme a lo largo de todo el array pero su promedio se sitúa visiblemente por debajo de 1 MHz debido al procedimiento de corte de la cerámica al que nos hemos referido en varias ocasiones. Los valores de sensibilidad son mejorables y, al igual que los de la impedancia, presentan cierta dispersión. En cualquier caso, las diferencias observadas en estos parámetros son en gran parte consecuencia del carácter 'artesanal' del proceso de fabricación:

- Diferencias apreciables en las dimensiones y superficie emisora de los elementos, como se aprecia en la figura 4.24a. Este inconveniente se acentúa en el prototipo EF4, en el que se utilizaron elementos procedentes de otros prototipos: habitualmente durante el proceso de extracción se producen fragmentaciones de la cerámica o rotura del metalizado original (figuras 4.24b y 4.24c).

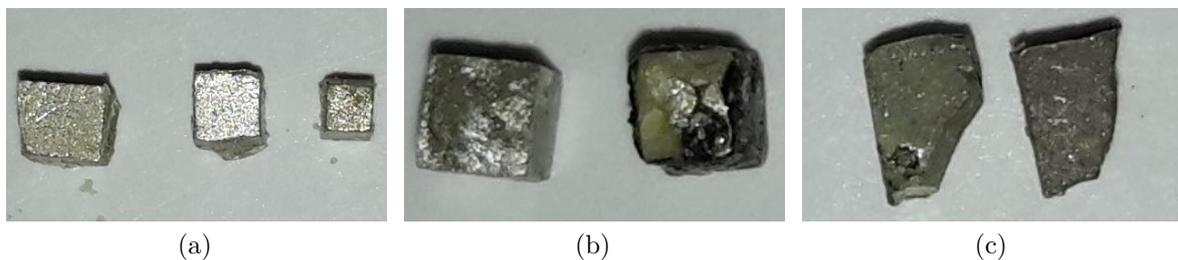


Figura 4.24: Defectos en elementos piezoeléctricos: (a) con diferente superficie emisora, el elemento más pequeño representa un caso extremo y no debería utilizarse; en las imágenes se aprecia que han perdido su metalizado original, (b) elementos reutilizados, (c) elementos deteriorados por fragmentación.

- Imperfecciones en el metalizado de los elementos tales como exceso de grosor de la capa de pintura conductiva (figura 4.25a), aparición casual de burbujas de aire, restos de adhesivo (figura 4.25b) o rayaduras por limpieza y pulido (figura 4.25c).

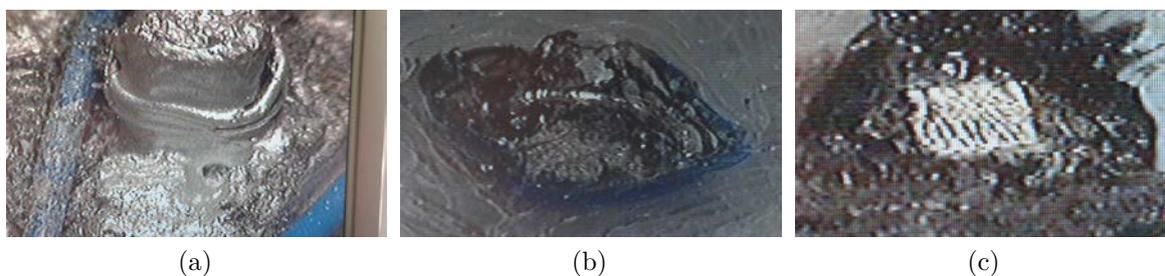


Figura 4.25: Imperfecciones en el metalizado de los elementos: (a) exceso de espesor de la capa de pintura de plata (imagen ampliada), (b) restos de adhesivo (color negro) sobre un elemento (imagen ampliada), (c) electrodo rayado tras ser pulido (imagen ampliada).

- Aparición de burbujas de aire atrapadas en la capa de backing durante su curado y falta de homogeneidad en su densidad y composición, tal y como se puede observar en la figura 4.26.

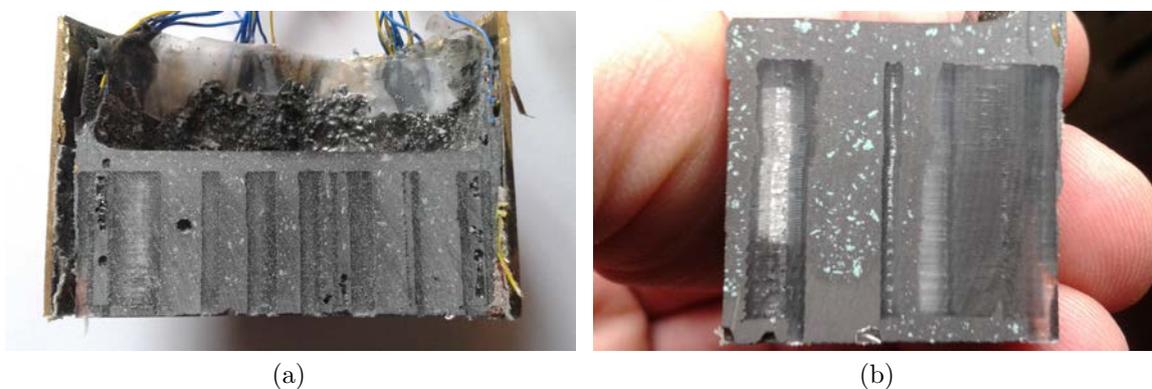


Figura 4.26: Imperfecciones en las columnas de la capa de backing: (a) burbujas de aire, (b) diferencias en densidad y composición: la composición de la mezcla no se muestra uniforme entre columnas, en algunas de ellas se aprecian partículas de goma en los estratos más bajos mientras que en otras la única fase presente es el W.

Capítulo 5

CONCLUSIONES y TRABAJOS FUTUROS

5.1. CONCLUSIONES

A continuación se resumen las aportaciones realizadas durante el desarrollo del presente trabajo.

En la primera parte de la memoria se aborda de forma teórica los retos tecnológicos que plantean la problemática de la generación de imagen 3D y se hace un repaso al estado del arte de los sistemas que proponen una solución, los arrays dispersos. Se hace patente la necesidad de tener disponible prototipos de laboratorio para poder probar nuevas aperturas.

A través de un enfoque eminentemente práctico, se ha presentado un detallado procedimiento para construir prototipos de arrays de transductores ultrasónicos de conformación bidimensional, analizando detalladamente cada una de sus etapas y proporcionando normas de diseño. En cada fase de fabricación se exponen diversas alternativas, mostrando siempre el sistema óptimo y el motivo de su elección. Durante el desarrollo práctico de este procedimiento se han podido extraer varias conclusiones:

- El uso de impresoras 3D facilita la construcción de la estructura del array, lo que constituye una de las aportaciones más novedosas de este trabajo.
- El procedimiento tiene sus limitaciones. La capacidad para el corte de la cerámica, el posicionado de los cables, etc ... están limitados por las posibilidades de manejo de los mismos.

- Aunque la fabricación de la capa de backing y su desempeño óptimo no era propiamente un objetivo de este trabajo, supuso una de las principales dificultades a resolver.
- Es necesario tener muy en cuenta las propiedades de los materiales utilizados, lo que exigió realizar numerosas pruebas y caracterizaciones de componentes. Las diferentes características de los adhesivos (viscosidad, tiempo de operación, ...) pueden suponer una gran diferencia en la facilidad de manufactura. La pintura de plata conductiva representa un material válido para realizar los metalizados de los electrodos de los elementos y cerrar las conexiones eléctricas con el cableado.

Se ha seguido un protocolo de medida para la validación experimental de la apertura, caracterizándola desde el punto de vista electromecánico y vibroacústico. Se obtuvieron buenas características de ancho de banda, patrón de vibración y acoplamiento entre elementos. Tal y como estaba previsto, la frecuencia central de los elementos individuales baja considerablemente respecto de la pieza original de cerámica de la que proceden. Por otro lado, los valores de frecuencia de los elementos son aceptablemente homogéneos. Para superar estas dificultades se propone como solución más documentada el uso de piezocomposites, lo que no supondría ningún cambio en la metodología propuesta.

En definitiva, se ha demostrado que es posible construir prototipos de arrays ultrasónicos cumpliendo los requisitos expuestos en los objetivos de este trabajo. Con ello se da la posibilidad a investigadores, universidades y personal ligado a los ensayos destructivos de disponer de un transductor de laboratorio de bajo coste para probar nuevas configuraciones bidimensionales y poder realizar pequeñas variaciones de forma rápida y flexible, constituyendo una interesante alternativa a propuestas más caras. Los resultados de las medidas experimentales hacen patente que su desempeño es adecuado para el trabajo experimental de laboratorio, objetivo de este trabajo. El procedimiento dista aún de ser capaz de producir resultados aptos para su uso comercial, no obstante las mejoras en materiales y en técnicas de impresión parecen ayudar en este sentido.

5.2. TRABAJOS FUTUROS

El proyecto aquí presentando supone una línea de trabajo muy activa que se encuadra en un proyecto de investigación que tiene como objetivo reproducir un sistema completo de imagen ultrasónica de bajo coste. No sólo el propio procedimiento de fabricación puede y debe seguir evolucionando sino que, además, se pretende añadir mejoras y más etapas que completen dicho sistema:

- La mejora más inmediata que se propone es la sustitución de los elementos cerámicos utilizados por elementos de piezocomposite 1-3. Con ello, y según abundante literatura [44, 64], se debería obtener una visible mejora en ancho de banda y sensibilidad. También permitiría aumentar la frecuencia de trabajo y eliminar en gran medida los modos radiales.
- Aunque los diseños de la estructura ofrecen un buen desempeño, podría ser interesante seguir evolucionándolos en busca de sistemas aún más practicables para llevar a cabo la inserción de elementos y cableado. Esto vendrá condicionado por las capacidades de impresión de los futuros sistemas, así como por su capacidad para integrar nuevos materiales.
- El backing ofrece un buen desempeño pero su capacidad amortiguadora aún podría ser superior, en este sentido es conveniente seguir investigando materiales y composición para mejorarlo.
- Con el fin de obtener una mejor explicación de los procesos de vibración es conveniente introducir en los modelos de elementos finitos la estructura de soporte de la apertura así como las propiedades de los materiales empleados. Esto podría ayudar a mejorar el diseño del array.
- La capa de adaptación sólo se incluyó en una apertura a modo de ensayo, sin que se observase aumento de transferencia de energía. Sería adecuado establecer un protocolo de medida más preciso para realizar un desbaste más controlado y conseguir una capa de adaptación que optimice efectivamente los pulsos de emisión.

La flexibilidad del proceso de fabricación aquí descrito permite seguir desarrollando diferentes prototipos, haciendo modificaciones en:

- Distribución de elementos, es decir, aplicarlo a otras geometrías y propuestas de arrays dispersos (otras conformaciones de espiral, anillos, etc ...).
- Número de elementos. El próximo paso sería extenderse a 128 elementos, lo que representa un objetivo plausible una vez confirmada la posibilidad de construir aperturas con 64 elementos.
- Frecuencia de trabajo, tratando de aumentarla.
- Tamaño de la apertura.

En cuanto al protocolo de caracterización:

- Como se explicó en el cuarto capítulo, elaborar un modelo teórico de transducción sería muy adecuado para poder contrastar y optimizar los resultados experimentales.
- Es necesario la caracterización completa mediante medida del campo acústico en distintas condiciones de focalización y deflexión.
- Por último, es de interés el análisis del comportamiento de la apertura en la elaboración de imágenes de entornos complejos. Para ello, también sería interesante el desarrollo y caracterización de un phantom ¹ 3D de laboratorio.

Haciendo alusión a sistemas de apoyo para la instrumentación del prototipo, se proponen varios trabajos dirigidos a mejorar o ampliar la funcionalidad del transductor:

- Acoplar una etapa de adaptación de impedancias. Una forma común de mejorar el ancho de banda y la sensibilidad es a través de circuitos inductivos que cancelen la componente reactiva. Ello incluiría la compensación eléctrica entre elementos. Por otro lado, la conexión hacia el sistema de imagen también requiere de un proceso de adaptación, teniendo en cuenta que estas conexiones coaxiales normalmente poseen una impedancia típica de 50 – 80 Ω .
- Desarrollar un sistema de generación de pulsos de alto voltaje 'portátil', embutido en la propia estructura del manipulador del transductor, adaptado a su geometría y dimensiones y haciendo uso de tecnología de hardware libre (Arduino, etc.).
- Introducir una red de preamplificadores para mejorar la recepción de señales.
- Introducir una red de circuitos de multiplexado para el montaje de sistemas de apertura sintética que minimicen las conexiones con el sistema de imagen.

¹Cuerpo de prueba utilizado para imitar el tejido humano.

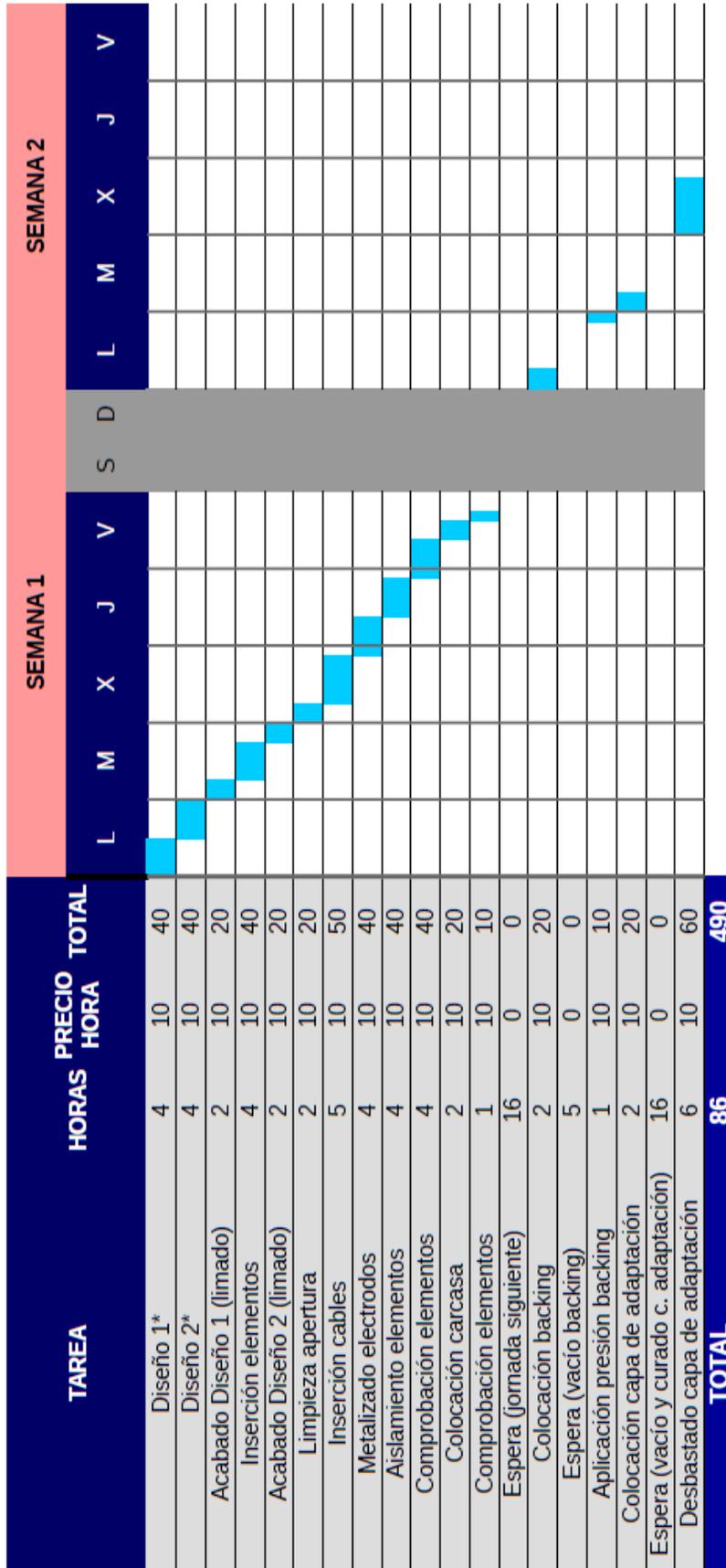
Apéndice A

PRESUPUESTO ECONÓMICO

En las figuras [A.1](#) y [A.2](#) se presenta la planificación temporal de la construcción de una apertura tipo siguiendo la metodología expuesta en este trabajo y el listado de los materiales necesarios. Con estos datos, se calculó el coste que produce su manufactura, teniendo en cuenta tanto el material como el gasto en mano de obra (estimado en 10 euros/hora). Aunque es obvio que el objetivo y desempeño de un prototipo comercial son muy diferentes y sus bondades están lejos de ser comparables con las aperturas experimentales aquí presentadas, es notable la gran diferencia en costes existente. Si consideramos que C es el precio medio aproximado en euros de un prototipo de transductor solicitado a una compañía especializada y ΔC es la diferencia con el coste de un array fabricado en este trabajo:

$$\frac{\Delta C}{C} = \frac{20,000 - 610}{20,000} = 0,969 \quad (\text{A.1})$$

Lo que indica una reducción en costes aproximada del 97%:



*Los tiempos indicados implican cambios en diseño sutiles: número de elementos, tamaño de apertura, etc; sin incluir modificaciones drásticas en la geometría de la apertura.

Figura A.1: Planificación temporal y coste de mano de obra.

PRESUPUESTO MATERIAL				
Material	Cantidad	Unidad	Precio/Unidad	Total
Cerámica piezoeléctrica	1.00	pieza	25.00	25.00
Plata conductiva RS Pro	1.00	g	4.68	4.68
Latón	0.05	m	4.00	0.20
Adhesivo Loctite 495	2.00	g	1.22	2.43
Adhesivo Loctite 480	2.00	g	1.09	2.17
Resina epoxi Araldite RX771C	50.00	g	0.08	4.00
Varios: papel adhesivo, jeringuillas, etc.	1.00	pieza	1.00	1.00
Polvo de tungsteno (25 micras, 99,9%)	105.00	g	0.70	73.50
Cableado masa (20 awg)	0.20	m	0.30	0.06
Cableado elementos (30 awg)	9.60	m	0.15	1.44
Resina epoxi Araldite 2020	40.00	g	0.14	5.62
Plástico PLA (1,75 mm)	35.00	g	0.02	0.70
Polvo de pumita (145 micras)	4.00	g	0.01	0.02
TOTAL				120.82

TOTAL COSTE FABRICACIÓN PROTOTIPO	
TOTAL MANO DE OBRA	490.00
TOTAL MATERIAL	120.82
TOTAL COSTE	610.82

Figura A.2: Coste de material y coste total.

Apéndice B

PROPIEDADES DEL MATERIAL PIEZOELÉCTRICO Pz27

Ferroperm Piezoelectric Materials

Material Data For Standard Test Specimens

Data are measured at 25°C and 24 hours after poling (Pz28 10 days after poling)

	Symbol	Dimension	Pz28	Pz29	Pz34	Pz35	Pz46
Electrical Properties							
Relative dielectric const. at 1 kHz	K_{33}^T	1	1000	2900	210	220	120
Diel. dissipation factor at 1 kHz	$\tan \delta$	10^{-3}	4	19	14	6	4
Curie temperature	$T_c >$	°C	330	235	400	500	650
Recommended working range	$<$	°C	230	150	150	200	550
Electromechanical Properties							
Coupling factors	k_p	1	0.58	0.64	0.07		0.03
	k_t	1	0.47	0.52	0.40	0.34	0.20
	k_{31}	1	0.34	0.37	0.05		0.02
	k_{33}	1	0.69	0.75	0.40		0.09
Piezoelectric charge coefficients	$-d_{31}$	10^{-12} C/N	120	240	5		2
	d_{33}	10^{-12} C/N	320	575	50	100	18
	d_{15}	10^{-12} C/N	375	650	40	50	16
Piezoelectric voltage coefficients	$-g_{31}$	10^{-3} Vm/N	13	10	3		2
	g_{33}	10^{-3} Vm/N	34	23	25	43	17
Frequency constants	N_p	Hz-m	2180	1970	2770		2470
	N_t	Hz-m	2010	1960	2200	1550	2000
	N_{31}	Hz-m		1410			
	N_{33}	Hz-m		1500			
Mechanical Properties							
Density	ρ	10^3 kg/m ³	7.70	7.45	7.55	5.60	6.55
Elastic compliances	s_{11}^E	10^{-12} m ² /N	13	17	7		11
	s_{33}^E	10^{-12} m ² /N	23	23	7		44
	s_{11}^D	10^{-12} m ² /N	11	15	7		11
	s_{33}^D	10^{-12} m ² /N	12	10	6		44
Poisson's ratio	σ^E	1	0.31	0.34	0.22		0.21
Mechanical Quality factor	Q_m	1	>1000	90	> 500	15 - 25	> 600

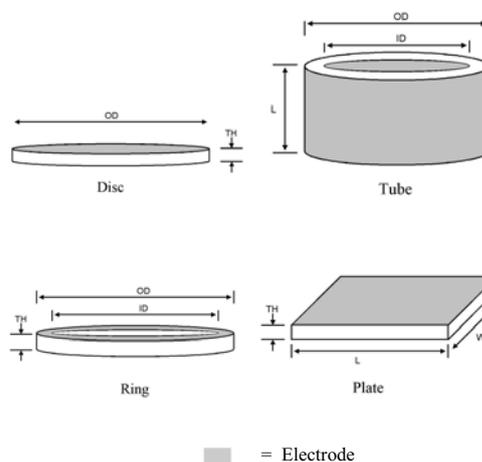
Standard tolerances:
 Electrical Properties $\pm 10\%$
 Electromechanical Properties $\pm 5\%$
 Mechanical Properties $\pm 2.5\%$ (Except for σ^E and Q_m)

Figura B.1: Propiedades electromecánicas del Pz27.

Standard Product Range

Certain commonly requested parts: discs, rings, tubes and square plates in Pz26 and Pz27, are carried in stock for prompt delivery.

Pz26 And Pz27 Discs				
Electrodes on flat surfaces				
OD (mm)	Th (mm)	Part Number		
		Pz26	Pz27	
5.00	0.5	26000	27000	
	1.0	26001	27001	
	2.0	26002	27002	
6.35	0.5	26010	27010	
	1.0	26011	27011	
	2.0	26022	27012	
10.00	0.5	26020	27020	
	1.0	26021	27021	
	2.0	26022	27022	
12.70	0.5	26030	27030	
	1.0	26031	27031	
	2.0	26032	27032	
16.00	0.5	26040	27040	
	1.0	26041	27041	
	2.0	26042	27042	
20.00	0.5	26050	27050	
	1.0	26051	27051	
	2.0	26052	27052	
25.00	0.5	26060	27060	
	1.0	26061	27061	
	2.0	26062	27062	
30.00	0.5	26070	27070	
	1.0	26071	27071	
	2.0	26072	27072	
38.00	0.5	26080	27080	
	1.0	26081	27081	
	2.0	26082	27082	
50.00	0.5	26090	27090	
	1.0	26091	27091	



Pz26 And Pz27 Tubes				
Electrodes on curved surfaces				
OD (mm)	ID (mm)	Th (mm)	Part Number	
			Pz26	Pz27
6.35	5.20	3.20	26201	27201
6.35	5.20	6.35	26202	27202
12.70	11.10	3.20	26203	27203
24.00	20.00	15.00	26204	27204
32.00	28.00	14.00	26205	27205

Pz26 And Pz27 Rings				
Electrodes on flat surfaces				
OD (mm)	ID (mm)	Th (mm)	Part Number	
			Pz26	Pz27
5.00	2.30	1.00	26101	27101
5.00	2.30	2.00	26102	27102
6.35	2.40	1.00	26111	27111
6.35	2.40	2.00	26112	27112
10.00	5.00	1.00	26121	27121
10.00	5.00	2.00	26122	27122
20.00	3.80	1.00	26131	27131
20.00	3.80	2.00	26132	27132

Pz26 And Pz27 Plates				
Electrodes on flat surfaces				
L (mm)	W (mm)	Th (mm)	Part Number	
			Pz26	Pz27
6.35	6.35	1.00	26301	27301
12.70	12.70	1.00	26302	27302
30.00	30.00	1.00	26303	27303
50.00	50.00	1.00	26304	27304

Figura B.2: Formatos de cerámicas Pz27 proporcionados por el fabricante.

Bibliografía

- [1] L. Gómez-Ullate, *Ensayos no destructivos por ultrasonidos*. Instituto de Automática Industrial, CSIC, 2007.
- [2] W. Hillger, “Ultrasonic testing of composites—from laboratory research to in-field inspections,” *AIPnD*, 2000.
- [3] J. D. N. Cheeke, *Fundamentals and applications of ultrasonic waves*. CRC press, 2012.
- [4] G. S. Kino, *Acoustic Waves: Devices, Imaging, and Analog Signal Processing*, (1987). Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1987.
- [5] T. Kundu, *Ultrasonic nondestructive evaluation: engineering and biological material characterization*. CRC press, 2003.
- [6] T. L. Szabo, *Diagnostic ultrasound imaging: inside out*. Academic Press, 2004.
- [7] Y. Bar-Cohen, D. Stubbs, and W. Hoppe, “Multiphase backing materials for piezoelectric broadband transducers,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 75, no. 5, pp. 1629–1633, 1984.
- [8] M. Karaman, P.-C. Li, and M. O’Donnell, “Synthetic aperture imaging for small scale systems,” *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, vol. 42, no. 3, pp. 429–442, 1995.
- [9] C. Holmes, B. W. Drinkwater, and P. D. Wilcox, “Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit–receive array data for non-destructive evaluation,” *NDT & e International*, vol. 38, no. 8, pp. 701–711, 2005.
- [10] J. L. Schwartz and B. D. Steinberg, “Ultrasparse, ultrawideband arrays,” *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, vol. 45, no. 2, pp. 376–393, 1998.

-
- [11] O. Martínez-Graullera, C. J. Martín, G. Godoy, and L. G. Ullate, “2d array design based on fermat spiral for ultrasound imaging,” *Ultrasonics*, vol. 50, no. 2, pp. 280–289, 2010.
- [12] B. Diarra, M. Robini, P. Tortoli, C. Cachard, and H. Liebgott, “Design of optimal 2-d nongrid sparse arrays for medical ultrasound,” *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 60, no. 11, pp. 3093–3102, 2013.
- [13] A. Octavio, R. L. O’Leary, S. M. Whiteley, Ó. Martínez-Graullera, C. J. Martín-Arguedas, L. Gómez-Ullate, and F. M. de Espinosa, “Air-coupled linear and sparse cmut array manufactured using mumps process,” *Microsystem technologies*, vol. 17, no. 10-11, pp. 1635–1644, 2011.
- [14] R. C. Houck, J. Cooke, and E. A. Gill, “Three-dimensional echo: transition from theory to real-time, a technology now ready for prime time,” *Current problems in diagnostic radiology*, vol. 34, no. 3, pp. 85–105, 2005.
- [15] I. O. Wygant, N. S. Jamal, H. J. Lee, A. Nikoozadeh, Ö. Oralkan, M. Karaman, and B. T. Khuri-Yakub, “An integrated circuit with transmit beamforming flip-chip bonded to a 2-d cmut array for 3-d ultrasound imaging,” *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, vol. 56, no. 10, pp. 2145–2156, 2009.
- [16] J. T. Yen and S. W. Smith, “Real-time rectilinear volumetric imaging,” *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, vol. 49, no. 1, pp. 114–124, 2002.
- [17] M. Karaman and M. O’Donnell, “Subaperture processing for ultrasonic imaging,” *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, vol. 45, no. 1, pp. 126–135, 1998.
- [18] K. Owen, M. I. Fuller, and J. A. Hossack, “Application of xy separable 2-d array beamforming for increased frame rate and energy efficiency in handheld devices,” *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, vol. 59, no. 7, 2012.
- [19] M. Yang, R. Sampson, T. F. Wensich, and C. Chakrabarti, “Separable beamforming for 3-d synthetic aperture ultrasound imaging,” in *Signal Processing Systems (SiPS), 2013 IEEE Workshop on*, pp. 207–212, IEEE, 2013.
- [20] S. A. Scampini, “Microbeamforming transducer architecture,” Sept. 22 2005. US Patent App. 11/576,401.

- [21] Z. Yu, M. A. Pertijs, and G. C. Meijer, “A programmable analog delay line for micro-beamforming in a transesophageal ultrasound probe,” in *Solid-State and Integrated Circuit Technology (ICSICT), 2010 10th IEEE International Conference on*, pp. 299–301, IEEE, 2010.
- [22] S. W. Smith, H. G. Pavy, and O. T. von Ramm, “High-speed ultrasound volumetric imaging system. i. transducer design and beam steering,” *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, vol. 38, no. 2, pp. 100–108, 1991.
- [23] C. E. Morton and G. R. Lockwood, “Theoretical assessment of a crossed electrode 2-d array for 3-d imaging,” in *Ultrasonics, 2003 IEEE Symposium on*, vol. 1, pp. 968–971, IEEE, 2003.
- [24] G. Lookwood and F. S. Foster, “Optimizing the radiation pattern of sparse periodic two-dimensional arrays,” *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, vol. 43, no. 1, pp. 15–19, 1996.
- [25] R. E. Davidsen, J. A. Jensen, and S. W. Smith, “Two-dimensional random arrays for real time volumetric imaging,” *Ultrasonic Imaging*, vol. 16, no. 3, pp. 143–163, 1994.
- [26] E. J. Candes, J. K. Romberg, and T. Tao, “Stable signal recovery from incomplete and inaccurate measurements,” *Communications on pure and applied mathematics*, vol. 59, no. 8, pp. 1207–1223, 2006.
- [27] F. Marvasti, A. Amini, F. Haddadi, M. Soltanolkotabi, B. H. Khalaj, A. Aldroubi, S. Sanei, and J. Chambers, “A unified approach to sparse signal processing,” *EURASIP journal on advances in signal processing*, vol. 2012, no. 1, p. 44, 2012.
- [28] A. Austeng, J. Kirkebo, and S. Holm, “A flexible algorithm for layout-optimized sparse cmut arrays,” in *Ultrasonics Symposium, 2004 IEEE*, vol. 2, pp. 1266–1269, IEEE, 2004.
- [29] A. Trucco, “Thinning and weighting of large planar arrays by simulated annealing,” *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, vol. 46, no. 2, pp. 347–355, 1999.
- [30] C. Boni, M. Richard, and S. Barbarossa, “Optimal configuration and weighting of nonuniform arrays according to a maximum islr criterion,” in *Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1994. ICASSP-94., 1994 IEEE International Conference on*, pp. V–157, IEEE, 1994.

-
- [31] V. Terrazas and J. Rodrigo, *Optimización de aperturas mediante técnicas de algoritmos evolutivos*. PhD thesis, Telecomunicacion, 2015.
- [32] A. Austeng and S. Holm, “Sparse 2-d arrays for 3-d phased array imaging-design methods,” *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, vol. 49, no. 8, pp. 1073–1086, 2002.
- [33] M. Akhnak, O. Martinez, L. Ullate, and F. M. de Espinosa, “64 elements two-dimensional piezoelectric array for 3d imaging,” *Ultrasonics*, vol. 40, no. 1, pp. 139–143, 2002.
- [34] B. Diarra, H. Liebgott, P. Tortoli, and C. Cachard, “2d matrix array optimization by simulated annealing for 3d hepatic imaging,” in *Ultrasonics Symposium (IUS), 2011 IEEE International*, pp. 1595–1598, IEEE, 2011.
- [35] A. Ramalli, E. Boni, A. S. Savoia, and P. Tortoli, “Density-tapered spiral arrays for ultrasound 3-d imaging,” *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, vol. 62, no. 8, pp. 1580–1588, 2015.
- [36] J. W. Goodman, *Introduction to Fourier optics*. Roberts and Company Publishers, 2005.
- [37] J. Villazón-Terrazas, A. Ibáñez, D. Romero-Laorden, and M. Parrilla, “A fast acoustic field simulator,” in *43o Congreso Español de Acústica (TECNIACUSTICA)*, Evora, pp. 1–9, 2012.
- [38] D. Reilly and G. Hayward, “A model to predict the transient radiation from segmented annular apertures radiating into solid media,” *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, vol. 43, no. 2, pp. 263–269, 1996.
- [39] J. J. Giesey, P. Carson, D. Fitting, and C. Meyer, “Speckle reduction in pulse-echo ultrasonic imaging using a two-dimensional receiving array,” *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, vol. 39, no. 2, pp. 167–173, 1992.
- [40] T. Fjield and K. Hynynen, “The combined concentric-ring and sector-vortex phased array for mri guided ultrasound surgery,” *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, vol. 44, no. 5, pp. 1157–1167, 1997.
- [41] H.-P. Schwarz, “Development of a divided-ring array for three-dimensional beam steering in ultrasonic nondestructive testing-theoretical and experimental results of a prototype,” *Materials evaluation*, vol. 45, pp. 951–957, 1987.

- [42] N. Chakroun, M. A. Fink, and F. Wu, “Time reversal processing in ultrasonic non-destructive testing,” *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, vol. 42, no. 6, pp. 1087–1098, 1995.
- [43] B. Delannoy, H. Lasota, C. Bruneel, R. Torguet, and E. Bridoux, “The infinite planar baffles problem in acoustic radiation and its experimental verification,” *Journal of Applied Physics*, vol. 50, no. 8, pp. 5189–5195, 1979.
- [44] M. Akhnak, *Arrays piezoeléctricos bidimensionales de apertura segmentada para la obtención de imagen acústica volumétrica*. PhD thesis, Complutense, 2002.
- [45] O. M. Graullera, *Arrays de Anillos Segmentados para la generacion de imagen ultrasonica 3D*. PhD thesis, Universidad Politécnica de Madrid, 2000.
- [46] Z. Chen, X. Song, L. Lei, X. Chen, C. Fei, C. T. Chiu, X. Qian, T. Ma, Y. Yang, K. Shung, *et al.*, “3d printing of piezoelectric element for energy focusing and ultrasonic sensing,” *Nano Energy*, vol. 27, pp. 78–86, 2016.
- [47] C. He, Y. Wang, Y. Lu, Y. Liu, and B. Wu, “Design and fabrication of air-based 1-3 piezoelectric composite transducer for air-coupled ultrasonic applications,” *Journal of Sensors*, vol. 2016, 2016.
- [48] V. Srinivasan and J. Bassan, *3D Printing and the future of manufacturing*. CSC, 2012.
- [49] T. Barry, “Ultra low cost project,” Jan. 01 1999. Accedido en 20-01-2017 a url: [http://traktor.org/files/sonar/Ultra-Low-Cost_Ultrasoundproject\(LOCUP\)/](http://traktor.org/files/sonar/Ultra-Low-Cost_Ultrasoundproject(LOCUP)/).
- [50] J. Czyżewski, P. Burzyński, K. Gaweł, and J. Meisner, “Rapid prototyping of electrically conductive components using 3d printing technology,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 209, no. 12, pp. 5281–5285, 2009.
- [51] M. Akhnak, O. Martinez, F. M. de Espinosa, and L. Ullate, “Development of a segmented annular array transducer for acoustic imaging,” *Ndt & E International*, vol. 35, no. 7, pp. 427–431, 2002.
- [52] S. Rokhlin, S. Golan, and Y. Gefen, “Acoustic properties of tungsten–tin composites,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 69, no. 5, pp. 1505–1506, 1981.
- [53] S. Lees, R. S. Gilmore, and P. Kranz, “Acoustic properties of tungsten-vinyl composites,” *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, vol. 20, no. 1, pp. 1–1, 1973.

- [54] H. Wang, T. Ritter, W. Cao, and K. K. Shung, "High frequency properties of passive materials for ultrasonic transducers," *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, vol. 48, no. 1, pp. 78–84, 2001.
- [55] K. K. Shung and M. Zippuro, "Ultrasonic transducers and arrays," *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*, vol. 15, no. 6, pp. 20–30, 1996.
- [56] J. D. Larson and J. G. Leach, "Tungsten-polyvinyl chloride composite materials-fabrication & performance [breaker page]," in *1979 Ultrasonics Symposium*, pp. 342–345, IEEE, 1979.
- [57] G. Kossoff, "The effects of backing and matching on the performance of piezoelectric ceramic transducers," *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, vol. 13, no. 1, pp. 20–30, 1966.
- [58] M. G. Grewe, T. Gururaja, T. R. Shrout, and R. E. Newnham, "Acoustic properties of particle/polymer composites for ultrasonic transducer backing applications," *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, vol. 37, no. 6, pp. 506–514, 1990.
- [59] H. Wang, T. A. Ritter, W. Cao, and K. K. Shung, "Passive materials for high-frequency ultrasound transducers," in *Medical Imaging'99*, pp. 35–42, International Society for Optics and Photonics, 1999.
- [60] A. Lutsch, "Solid mixtures with specified impedances and high attenuation for ultrasonic waves," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 34, no. 1, pp. 131–132, 1962.
- [61] N. Nguyen, M. Lethiecq, B. Karlsson, and F. Patat, "Highly attenuative rubber modified epoxy for ultrasonic transducer backing applications," *Ultrasonics*, vol. 34, no. 6, pp. 669–675, 1996.
- [62] A. R. Selfridge, "Approximate material properties in isotropic materials," *IEEE transactions on sonics and ultrasonics*, vol. 32, no. 3, pp. 381–394, 1985.
- [63] J. M. Cannata, J. A. Williams, Q. Zhou, T. A. Ritter, and K. K. Shung, "Development of a 35-mhz piezo-composite ultrasound array for medical imaging," *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, vol. 53, no. 1, pp. 224–236, 2006.

-
- [64] J.-Y. Chapelon, D. Cathignol, C. Cain, E. Ebbini, J.-U. Kluiwstra, O. A. Sapozhnikov, G. Fleury, R. Berriet, L. Chupin, and J.-L. Guey, “New piezoelectric transducers for therapeutic ultrasound,” *Ultrasound in medicine & biology*, vol. 26, no. 1, pp. 153–159, 2000.